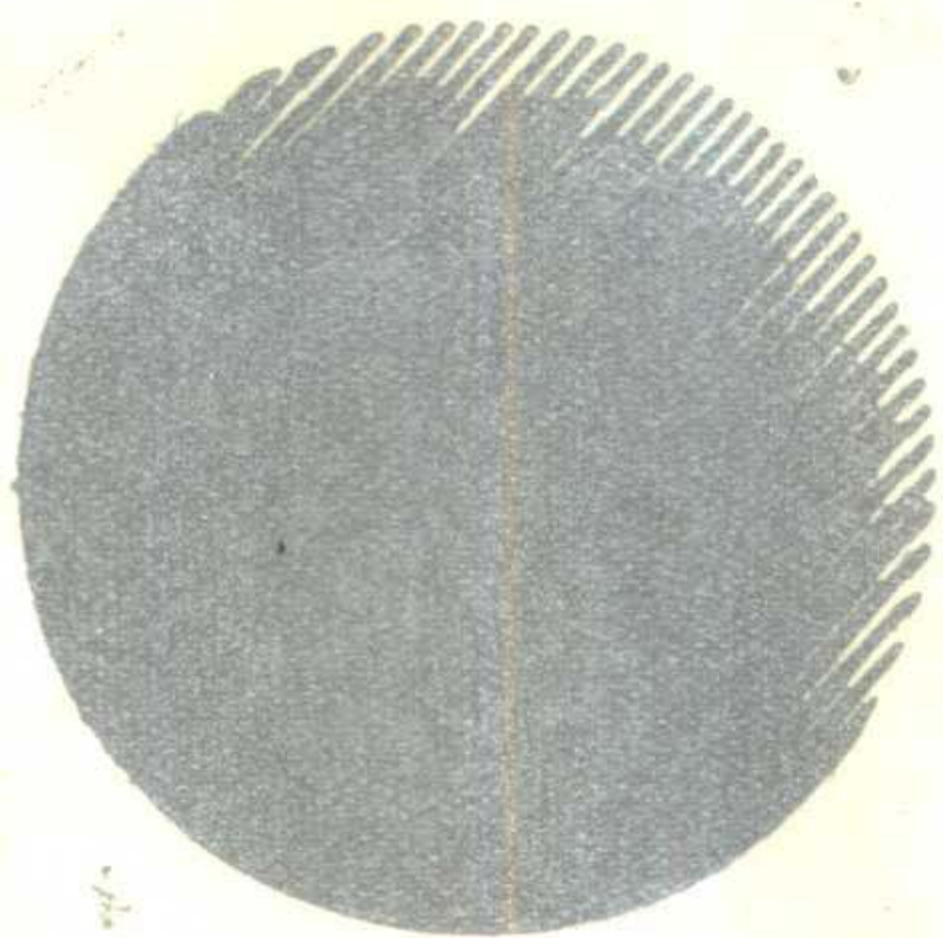


系统科学



走向二十一世纪的人需要多维的视野和崭新的知识结构《新学科丛书》以全方位的态势和准确、快速的信息,向您展示当代国内外引人注目的综合学科、边缘学科、交叉学科和分支学科。



新学科丛书



系 统 科 学

邹珊刚 黄麟维 李继宗 编著
苏子仪 马名驹 朴昌根

上海人民出版社

责任编辑 陈 军
封面装帧 沈蓉男

• 新学科丛书 •

系 统 科 学

邹珊刚 黄麟雏 李继宗 编著
苏子仪 马名驹 朴昌根

上海人民出版社出版、发行
(上海绍兴路 54 号)

新华书店上海发行所经销 上海新华印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 15 插页 2 字数 317,000

1987 年 11 月第 1 版 1987 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—15,000

ISBN 7-208-00071-9 / Z·7

书号 17074·43 定价 3.40 元

《新学科丛书》前言



社会主义中国正在腾飞。

腾飞的年代要求人们具有丰富的知识。

当代知识体系已呈现出多彩的态势、全新的格局——现代科学日趋高度分化和高度综合，自然科学与社会科学相互渗透和结合，出现了许多综合学科、边缘学科和分支学科。

我们正面临着知识的挑战。

为了迎接这一挑战，《新学科丛书》将以马克思主义为指导，依据我国的国情，适应社会主义现代化建设的需要，有计划地、有目的地、通俗地介绍以社会科学为主的各门新学科。

《新学科丛书》，理论性与应用性并重，学术性与普及性兼顾，力求用新思想、新材料、新形式、新语言，提供丰富的新知识和新信息，以帮助人们开阔视野，更新知识结构，掌握科学方法，为繁荣社会主义科学文化事业服务。

编 者

序

本世纪以来科学技术突飞猛进，新兴学科层出不穷。科学技术作为推动社会发展的强大力量，不仅它的成果被直接应用于生产，促进了社会经济的发展，而且科学技术作为综合的知识体系，也为我们提供了观察分析复杂多变的经济、社会、政治等现象的工具，从而帮助人们在更广泛的范围内进行科学的思考、判断和决策，在更大程度上推动整个社会的发展以及科学技术自身的进步。在现代科学技术的体系中，系统科学占有特殊的地位，它是彻底改变世界科学图景，使当代科学家思维方式发生革命性转变的最富有意义的成果之一。以系统作为研究对象的系统科学的形成和发展，以及它在各个领域的广泛应用，给自然科学、技术科学、工程技术和社会科学提供了一种跨越学科界限，从整体上分析问题、处理问题的新范式、新思想、新方法，有利于填平自然科学与社会科学之间的鸿沟，消除东西方文化的隔阂。

从贝塔朗菲提出一般系统论至今已经过去半个世纪，在此期间不仅产生了运筹学、控制论、信息论、系统工程、大系统理论和系统动力学，而且还出现了耗散结构理论、协同学、超循环理论、一般生命系统论、社会系统论，以及近十年来我国学者提出的泛系分析和灰色系统理论等。根据系统研究已经取得的成

果,有可能在此基础上建立统一的系统科学体系。贝塔朗非晚年在《一般系统论的历史和现状》一文中,曾提出了一般系统论研究的几个方面,实际上为系统科学的体系提出了一个初步的设想。我国著名科学家钱学森自1979年以来,多次发表关于建立系统科学体系的建设性意见,并参加和主持了系统科学基础理论的研究工作。《系统科学》一书,就是吸取了贝塔朗非和钱学森关于系统科学体系的思想,力图从系统工程、系统方法理论、系统学这三个层次上,以及在带有一般科学方法论性质的、作为系统科学与哲学的中介的系统论方面,反映系统科学理论研究和实际应用的现有成果。

为了让读者了解系统理论研究的最新信息,我们特邀请国内外著名学者撰写了专稿,武汉数学工程研究所吴学谋研究员、华中工学院邓聚龙教授分别为本书第九章撰写了“泛系理论”、“灰色系统理论”两节,介绍了他们各自在国际上首先创导的泛系理论、灰色系统理论的概念和方法。尤为令人高兴的是,联邦德国斯图加特大学哈肯教授和美国加利福尼亚大学米勒教授都欣然为本书撰写了“协同学”和“生命系统理论”等节,谨在此表示深切的谢意。

本书是在集体讨论基础上分头执笔编写的,具体分工如下:

- | | |
|-----|---------|
| 序言 | 邹珊刚 |
| 第一章 | 李继宗 |
| 第二章 | 李继宗 朴昌根 |
| 第三章 | 邹珊刚 |
| 第四章 | 黄麟维 |

第五章 朴昌根

第六章 苏子仪

第七章 马名驹 邹珊刚

第八章 黄麟维 邹珊刚

第九章 米勒 哈肯 邓聚龙 吴学谋 黄麟维 朴昌根
马名驹

稿子集中后,邹珊刚、李继宗、朴昌根又对各章节进行了修改。全书由邹珊刚统编。

此书虽然反映了编著者近几年来在系统科学方面所作的工作,但在很大程度上是综合吸取了国内外的最新研究成果,并引用了许多学者的著作和论文,在此特向有关同志表示敬意和感谢。

《系统科学》一书的编写,得到了华中工学院、复旦大学、西安交大、上海机械学院以及上海人民出版社的热情支持,谨此,表示衷心的感谢!

目 录

序.....	1
第一章 系统科学的历史和现状.....	1
第一节 系统科学产生的历史背景.....	1
第二节 系统科学的发展.....	12
第三节 系统科学的研究对象、性质和体系.....	25
第四节 系统科学的地位和作用.....	38
第二章 系统与系统概念.....	46
第一节 系统的概念.....	46
第二节 系统的普遍性.....	54
第三节 系统的分类.....	58
第三章 系统的整体性.....	73
第一节 系统整体的观念.....	73
第二节 整体的加和性与非加和性.....	83
第三节 整体性原理.....	91
第四章 系统的结构与功能.....	99
第一节 系统的结构.....	99
第二节 系统的功能.....	113
第三节 系统的结构与功能的关系.....	117

第四节	不同系统之间结构变革的相关性·····	124
第五章	系统的进化·····	129
第一节	进化论的进化·····	129
第二节	系统进化的描述·····	142
第三节	系统进化中的质变·····	160
第四节	系统进化的机制·····	181
第六章	系统控制与信息·····	197
第一节	系统控制思想和理论·····	197
第二节	控制与调节·····	215
第三节	系统的自适应控制·····	225
第四节	信息与信号·····	236
第七章	系统分析·····	251
第一节	系统分析的概念和内容·····	251
第二节	系统的目标·····	260
第三节	系统模型化·····	268
第四节	系统优化·····	280
第五节	系统的评价·····	295
第六节	系统的可靠性和可行性·····	304
第八章	系统技术·····	316
第一节	系统的分解与协调技术·····	316
第二节	计划评审技术·····	332
第三节	系统的设计·····	337
第四节	预测技术·····	352
第五节	系统决策·····	363
第九章	现代系统理论·····	382

第一节	贝塔朗菲的一般系统论·····	382
第二节	耗散结构理论·····	392
第三节	超循环理论·····	398
第四节	系统动力学·····	406
第五节	协同学：理论与应用·····	417
第六节	生命系统理论·····	427
第七节	泛系理论·····	443
第八节	灰色系统理论·····	450
主要参考文献·····		463

第一章 系统科学的历史和现状

系统科学的兴起是本世纪科学发展的重大事件之一。二十世纪以来科学、技术、哲学和管理方面变革性的发展，是系统科学赖以形成的背景和根源。贝塔朗菲、维纳、申农、钱学森、普利高津、哈肯等人的工作为这门学科的产生和发展作出了卓越贡献。系统科学是以系统及其机理为对象，研究系统的类型、一般性质和运动规律的科学。它具有横向性、综合性、功能行为性质和方法论性质。作为一门学科体系，系统科学包括三个理论层次。在现代科学技术和哲学、社会科学中，系统科学思想和理论具有十分重要的作用和意义，它为人们认识世界和改造世界提供了富有成效的、现代化的“新工具”。

第一节 系统科学产生的历史背景

系统科学的产生并不是偶然的，它是二十世纪以来在科学、技术、管理和哲学思想方面的革命与变革的必然结果。

一、技术革命：信息与控制

自从法拉第发现电磁感应现象和麦克斯韦确立电磁场基本方程式以来，电力和电子技术得到了突飞猛进的发展，并成为第

二次技术革命的中心内容。由于电子学基础理论不断发展和在近现代科学技术中的广泛应用,已在工业、医疗、军事、核物理等方面产生出许多重要的新技术和新兴电子学科。现代通讯技术和电子计算机技术就是在电子技术和新兴电子学科基础上发展起来的。1948年维纳在他的《控制论》中说:“如果说十七世纪和十八世纪初叶是钟表的时代,十八世纪末叶和十九世纪是蒸汽机的时代,那么现在就是通讯和控制的年代。电工学上曾有过一次分裂,德国人把它叫作强电流技术和弱电流技术之间的分裂,我们知道,这就是动力工程学和通讯工程学的划分。正是这个分裂把过去的年代和我们现在生活着的时代区分开来”。^①从强电流技术到弱电流技术,从动力工程学到通讯工程学,这正是现代科技革命的主流和趋势。这场革命产生了微电子、激光、光导纤维、生物工程、机器人等新技术和一系列新兴学科。特别是六十年代以来微电子技术飞速发展,对经济和社会的变革已经产生了广泛的影响。它实际上成为信息革命的先锋。

第一次产业革命在本质上是用蒸汽机(后来又是内燃机和电动机)来代替人的体力劳动,从而大大地提高了劳动生产率;新的产业革命或新技术革命在本质上则是用电脑(微处理机)使信息和电脑化的智能与机器系统紧密结合,来代替人的体力和脑力劳动,从而极大地提高劳动生产率。这就使人们作用于劳动对象的方式发生了变革。过去人们是通过动力机、传动机和工作机所形成的机器组合作用于劳动对象的;现在在机器的三个组成部分之外又创造了控制机,把原属于人脑的智力工作也

^① 维纳:《控制论》,科学出版社1963年版,第39页。

部分地转移到机器上去了。而信息的运动又成为“控制机”活动的核心,所以,确如维纳所说,信息与控制是新技术革命时代的主要特征。正是在这种历史条件下,本世纪四十年代中期几乎同时产生了控制论、信息论、运筹学、以及通讯技术、控制技术和电子计算机。

二、科学革命:统计与进化

在近代科学史上,经典力学的机械决定论统治了达三个世纪之久。它构造了一个封闭的简单的宇宙模式,其中所有事物都精确地有规律地运动着。这个宇宙模式认为,一个系统只要知道了它的初始状态,就可以根据普遍适用的动力学规律推演出它随时间变化经历的一切状态。在这种宇宙模式和自然观的支配下,科学唯一的目的是对客体进行精确地解剖,从部分直接引出整体的性质。而受整体相互作用制约的那些性质、层次之间的联系和转化,都在研究者的视野之外。十九世纪自然科学向辩证法的复归,主要是破除了自然界绝对不变的见解;然而,十九世纪的科学仍然是经典科学发展的继续,自然科学的综合主要限于科学内部的统一,对科学世界图景的认识,对联系和发展的探索仍未超出机械决定论的框架。

从十九世纪后期起,随着人类认识领域不断扩展,自然科学研究进入到大量元素组成的具有大量自由度的复杂体系,由于构成这种体系的元素数量庞大,它们呈现出复杂的随机运动,相邻元素之间,元素和整体之间都缺少固定不变的联系。在这种情况下,经典力学就显得无能为力了。这不仅因为它难以对付系统固有的复杂性,更重要的是这种复杂性导致了事物的变化

——即使精确地确定粒子的全部轨道和它们之间的相互作用力，也不能给我们提供整体知识。统计规律的发现是一个根本性的突破。它揭示了层次之间的联系，宏观热力学问题可以从微观分子的相互作用中得到解释。通过对大量元素行为的统计处理，使人们看到，大量不能作出详尽预测的复杂因素，却表现出十分确定的整体规律。这种整体的性质，如元素强度、温度、熵等等，元素之间、不同层次之间的联系形式等，不为元素单独所有，也不由它们的线性迭加所产生，这是它们相互联系、相互作用的状态和过程本身。所谓整体趋势、有序性、必然性等等正是这种关系的表现。大量事物的并存和影响是导致随机现象的根本原因。这一思想首先是从十九世纪后期玻耳兹曼和二十世纪初吉布斯关于统计物理的研究开始的。统计规律就是这一思想的集中体现。所以维纳说：“我们必须把二十世纪物理学的第一次大革命归功于吉布斯，而不是归功于爱因斯坦、海森堡或普朗克。”^①

二十世纪以来，统计规律和概率思想，在科学的所有领域都得到了深化和发展，并且改变了科学认识的传统观念，也改变了人们对规律的认识。例如，在量子力学中，哥本哈根学派对薛定谔方程中的波函数作统计解释时，提出了几率波的概念，认为整体系统的单个粒子都服从统计规律。当代的计算机实验，实验室的测量和一些数学分析进一步证明，随机性能够在一定的发展过程中，作为内在的“必然的行为而发生作用”。由此，人们不再认为统计规律是我们对客观过程知之甚少的表现，而是

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆 1978 年版，第 4 页。

复杂系统本身所具有的一般规律。我国物理学家郝柏林说：“自从 1687 年牛顿发表《自然哲学之数学原理》一书以来，确定论观点在自然科学体系中一直被奉为正统。概率论描述则被当作‘不得已而为之’的补充。现在事情起了变化。牛顿力学的框架里冒出了内在随机性，根本用不到什么‘大数定律’来论证随机概念。三体问题中已经有好几个随机性、‘不可预言’的实例。可以证明，这类情况不是稀有的特例，而是普遍的行为。完全确定论的描述在牛顿力学中倒限于稀如凤毛麟角的特例”。^①凡是由大量较小单元层次构成的系统的性质，结构的形成、稳定和变化的条件与过程，有序和无序之间的联系和转化，都可以用概率统计的方法去研究，统计规律把不同层次联系起来，揭示了它们之间既存在着一致和连续性，又存在着差异和间断这两种情况的统一。它们既自我依存又相互依存，每个层次的性质取决于它们的整体结构，又受制于高一层次并为高一层次提供了根据，最终反映客观世界是一个多层次、复杂结构的整体。在这个意义上，我们可以说，只有对统计规律进行深入的探讨，才会有助于我们把握当代科学思想的脉搏。统计即是系统科学的基本思想，也是它的重要数学工具。

和统计思想相联系的进化(或演化)思想也是本世纪科学思想的重要支柱。进化论作为一种科学理论是十九世纪五十年代的产物。在那富有创造性的年代里，在科学的三个领域几乎同时产生了科学的进化论，这就是克劳修斯的熵增加原理，达尔文的物种进化论和马克思的唯物史观。

^① 郝柏林：《自然界的秩序和混沌》，《百科知识》1984 年第 1 期。

1850年克劳修斯指出，热不能自动从低温物体流向高温物体，即热传导是不可逆的。十五年以后他又引入一个与系统的具体要素无关的物理学态函数——熵(S)，这是他最伟大的功绩。热力学第二定律用熵来表示，即在闭系统中，熵变不会小于0，即： $ds/dt \geq 0$ ，这就是著名的熵增加原理。按照这个原理，闭系统的熵是单向地增加的，不可逆的，如熵达到最大值，系统就处于热力学最可几状态，即稳定的热平衡态。由于熵概念的提出，自然界的进化从此就可以用物理系统本身所固有的物理的变化来说明了。不过克劳修斯的进化论实质上是退化论。在他看来，自然界由低熵状态倒退到高熵状态，即由有序倒退到无序，最后整个宇宙将要处于最混乱的热平衡态或热寂状态。他把熵原理由闭系统简单地外推到整个宇宙显然是错误的，结果导致了与达尔文生物进化论相反的结论。然而，由于熵概念的引入，科学已经可以用系统的熵的变化来研究物理世界的进化和物理事件的方向性了，时间从此不再是单纯的运动参量，而变成物理的事实。

1944年，著名物理学家薛定谔出版了《生命是什么？》一书，在熵原理的基础上，用热力学和量子力学理论来解释生命的本质。他指出，无生命物质中可具有周期性晶体结构，然而生命物质却以非周期性晶体结构形式出现，前者简单，后者复杂。“两者之间结构上的差别，就好比一张是一再重复出现同一种花纹的糊墙纸，另一幅则是巧夺天工的刺绣。”^①他认为生命是靠“负熵”来维持和发展的，它可以从环境中获得“有序”以维持自身组

① 薛定谔：《生命是什么？》，上海人民出版社1973年版，第5页。

织。薛定谔对生命本质的研究，其意义在于开拓了用物理语言描述和分析生命本质的一个新方向。虽然他也没有解决热力学第二定律(熵增加原理)和达尔文生物进化论之间的矛盾，但他提出“负熵”概念却为这一问题的解决打开了思路。为六十年代以后系统自组织理论的发展奠定了重要的基础。

深入下去，目的性也重新进入了科学概念体系中。达尔文在进化论上的伟大革新，主要在于他承认进化并非是一种拉马克式的高而更高，好而又好的自发上升的过程，而是这样一种现象，“生命体其中表现出了(甲)多向发展的自然趋势和(乙)保持自己祖先模式的趋势。这两种效应的结合就铲除了自然界中乱七八糟的发展，同时通过‘自然选择’的过程淘汰掉了那些不能适应环境的有机体。其结果就留下了多少能够适应环境的生命形式之剩余模式(residual pattern)。按照达尔文的见解，这个剩余模式便是万有的合目的性的表现”。^①这就是马克思所说的达尔文“不仅第一次给了自然科学的‘目的论’以致命的打击，而且也根据经验阐明了它的合理意义”之所在。以后，由法国生物学家克劳德·贝尔纳开创的，美国科学家坎农发展了的稳态理论，揭示了生物目的性的内在机制，而维纳的研究，则进一步指出，稳态是由负反馈实现的，因此，“一切有目的行为都可以看作需负反馈的行为”，据此，维纳把机器与动物类比而创立了控制论。

三、哲学革命：有机论代替决定论

科学上的新思想、新概念和综合化、整体化的趋势，必然在

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆 1978 年版，第 26 页。

哲学上得到反映。早在十九世纪二十年代,科学还没有发展到今天的水平,无产阶级革命导师马克思、恩格斯就已经立足于当时的科学成就,提出了一种崭新的自然观——辩证唯物主义自然观,把世界看成是一个运动、进化、发展着的整体;同时,他们把人类社会作为一个有机的系统的整体来研究,发现了它的运动规律并着重分析了资本主义阶段上的具体形态和规律性。从这以后,特别是本世纪以来,即使是唯心主义哲学家,也不能面对新的科学思潮而无动于衷。

英国实证主义哲学家和社会学家斯宾塞从唯心主义立场出发接过生物学中的进化论和有机论,创立了所谓“社会有机论”,把社会看作是一个进化的、虽然没意识却有器官和组织的有机的整体或“超有机体”。法国生命哲学的创始人柏格森强调了物理学时间和进化论及生物学时间的不同。前者是可逆的,其中没有新生事物出现;后者是不可逆的,其中不断地出现新生事物。他把生物系统描述成积聚能量而不是消耗能量的;是创造差别而不是趋于平衡化的;是建立秩序、结构和组织,而不是造成混乱、衰退和无组织的。柏格森令人信服地阐明了反熵趋势是生命体的一个重要特征。

二十世纪二十年代,英国著名哲学家怀特海提出了过程哲学或有机体论,强调从整体上研究机体的结构、个性和相互关系,研究造成有机体存在和变化的条件。他认为机体的根本特征是活动,活动表现为过程,过程就是机体各个因素之间的有内在联系的、持续的创造活动,它表明一机体可以转化为另一机体。与此同时美国统计学家劳特卡、俄国哲学家和生理学家波格丹诺夫都把社会设想为有机的系统。波格丹诺夫在他 1925

年出版的《组织形态学》一书中，试图建立一门具有元科学性的一般组织学，用有机的、组织的也就是系统的观点理解社会形态及其发展规律。至今，苏联学术界仍把他看作对一般系统论具有开拓性贡献的学者之一。

由于德国心理学家苛勒用“格式塔”的观点，即完形结构的观点研究物理学、心理学和非生命系统的一般属性，由于瑞士语言学家索绪尔用结构的方法研究语言学，半个多世纪以来，结构主义思潮占据了西方语言学、心理学、社会学、美学以致于生物学、物理学和数学的大部分领地，并且在哲学上形成颇为可观的思潮。

系统、整体、结构、进化等等这些以概念形式表达的音符，构成了现代科学思想交响乐的主旋律，体现了二十世纪的科学精神。系统科学正是这个时代精神的结晶。

四、管理革命：从经验到科学

系统科学的产生和发展，与管理科学的产生和发展存在着密切的关系。

十九世纪末，随着自由资本主义开始向垄断资本主义过渡，生产规模日益扩大，开始出现了专门从事组织管理的管理阶层。当时的管理一般只凭经验去处理安排生产过程中的分工协作问题，也开始建立了一些岗位责任制之类的管理制度。十九世纪七十年代以后，又出现了象英国的卡文迪许实验室，美国的爱迪生“发明工厂”等机构，使管理开始跨进了生产与科学研究两个领域。而且当时许多不同生产部门也开始组成联合企业，形势迫切要求对旧的管理方法来一场变革。

1911年,美国工程师泰罗(1856—1915)首先提出“科学管理”的概念。他所创立的“科学管理方法”,是解决在一定设备条件下,科学地规定每一道工序的最合理的加工时间,即“工时定额”的学问。他通过对工人操作动作的分析,消除不必要的、无用的动作,确定更正确的工作方法和工时定额,采用最有效的会计制度和管理制度等等。很明显,这个制度提高了工人的劳动强度,使资本家从工人身上榨取更多的血汗,列宁称它为“血汗”工资制度。但另一方面列宁又看到了泰罗制在生产过程合理化方面所作的改革的科学性和进步性,说它是“一系列的最丰富的科学成就”。当然,泰罗所解决的还只是作业方面的问题。泰罗等人此时还没有注意到管理组织与管理职能的执行之间的相互关系的问题。换句话说,泰罗制还没有涉及到管理方面的系统化,但它却加强了生产过程中的现场管理或操作管理,从而为管理的系统化准备了条件。

法国的采矿工程师亨利·法约尔(1841—1925)对于管理组织和管理过程的系统化起了重要作用。他提出了管理组织与职责划分的思想,他把管理的目标集中在提高整体组织的效率上,为此,他把管理过程划分为五个部分:(1)计划;(2)组织;(3)指挥;(4)协调;(5)控制。他认为计划工作是最重要的,也是最难办的管理职责,计划不周会导致“踌躇、出差错和不适时的改变方向,而这些正是企业衰败(如果不是灾祸的话)的起因”。法约尔把组织工作看成是关于物力和人力的组织问题,而他所探讨的仅限于人力方面的组织问题。组织建立之后,为了使组织行动起来,指挥的职能就显得很重要了。法约尔规定了指挥者应当遵守的守则:全面了解工作人员;淘汰不能胜任工作的人;充

分了解组织及其雇员之间的协议；树立良好的榜样；定期审查组织结构等等。法约尔认为一个企业要取得成功，协调和控制也是必不可少的，他主张每周召开一次各部主任和联络人员的会议，以便改善相互之间的协调。控制的职责是“核实情况的进展是不是同既定的计划、发出的指示及确立的原则相符合”。控制的目的在于找出错误，加以纠正，并防止不再发生。法约尔说，有效的控制必须在一段合乎情理的时间内进行，并且应当采取适当的纠正措施。此外，他还强调，这样的控制应该使各部管理人员和执行控制职能的人员不发生管理上的重叠。^① 他的管理思想可以看作是组织管理。

在法约尔之后，人们逐渐对管理职能和管理机构更加重视。德国的韦伯(1864—1920)等进一步研究了组织管理职能和组织管理机构的模型；美国也开始注意质量管理，并出现了一些新的管理体制。但是总的来说，第二次世界大战之前，西方管理的侧重点是把人看作“机械因素”、“活的机器”加以科学而又强制的管理，而把工厂作为一个系统的观念不强。

本世纪二十年代以后对管理科学影响较大的还有美国社会系统学派的创始人切斯特·巴纳德(1886—1961)，他的主要贡献在于对组织的性质和理论方面的研究。他把组织定义为“两个或两个以上的人，有意识的加以协调的活动或效力的系统”。他认为这个定义适用于军事的、宗教的、学术性的、工商业的、互助会的各种类型的组织。各种类型组织之间的差异，在于其物质的和社会的环境，所包含成员的数量和种类，以及成员向组织提供

^① 亨利·莫格森：《现代管理原理》，商务印书馆1980年版，第22页。

贡献的基础。1938年,巴纳德发表了《经理人员的职能》一书,第一次把企业看成是一个由物质的、生物的、个人的和社会的几方面的要素所组成的一个“协作系统”,企业管理的核心问题就是这几方面要素的协调。一个系统要作为一个整体来对待,因为它的每一个组成部分是以一定方式同其它的每一个组成部分相关联的。系统有各种级别:一个企业内部的各个部门或子系统是较低级的系统,由许多系统组成的整个“社会”,是一个高级的系统。^①巴纳德基本上把企业看成是一个闭系统,即同周围环境没有多大联系的一个系统。这就是系统管理的雏形,它为系统工程的产生从管理方面准备了条件。

管理科学发展的趋势表明,本世纪以来,管理已开始由经验和艺术进入到科学管理阶段,初步注意到生产部门的有序性、系统性和整体性。这对现代系统科学的形成起了促进作用。

第二节 系统科学的发展

一、贝塔朗菲一般系统论的创立

系统科学的思想首先是在本世纪二十年代奥地利学者贝塔朗菲研究理论生物学时提出来的。他用机体论生物学批判并取代了机械论和活力论生物学,建立了有机体系统的概念,最后把机体论生物学拓广成具有普遍意义和世界观意义的一般

^① 参见孙耀君:《西方企业管理理论的发展》,中国财政经济出版社1981年版,第四章第一节。

系统论。

从二十年代开始，贝塔朗菲就注意到当时在生物科学中流行的机械论所忽视并加以否定的正是生命现象中最基本的东西。生命机体是一个有机的整体或系统，活的东西的基本特征是它的组织，生物科学的主要目标就在于发现不同层次上的组织原理。二十年代后期，贝塔朗菲提出了生物学中的有机概念，接着发表了《有机生物学》、《现代发展理论》、《生命问题》等著作。在《有机生物学》中，他强调将活的有机体当作“组织系统”的必要性，并定义了“生物学的基本任务就是发现生物组织中层次水平上生物系统的规律。”

贝塔朗菲认为传统物理学所处理的只是闭系统，即被看成与环境相隔离的系统，而每一个生命有机体本质上是一个开放系统，它是在连续不断地吸入与排出之中，在不断构成与破坏组织成份之中维持其自身的。只要它还是活的，它就不会处于化学与热力学平衡状态，而是处于与此不同的稳态之中。开放的有机体系统是不受热力学第二定律支配的。显然，传统物理学的公式，原则上不能适用于作为开系统和稳态的生命有机体。贝塔朗菲把他的机体论生物学称之为“机体系统论”，并把这个理论概括为整体性、动态结构、能动性和组织等观点。但是，他没有停留在机体系统论的水平上。他敏锐地觉察到“寻求理论生物学基础的尝试会从根本上改变世界的面貌”，这意味着在生物学领域将爆发一场哥白尼革命。在他看来，这场“有机革命”与现代技术革命具有同等重要的意义，它孕育着难以估量的前景。这场革命的核心就是系统概念。用贝塔朗菲自己的话说，系统，“这个表面上看来平淡、抽象而空洞的概念，其实充满了隐秘、内

涵、酵素和爆炸的潜力”^①这个具有爆炸性潜力的系统概念，从此成了他的理论的细胞，并促使他从机体论生物学进一步萌生有关一般系统论的思想。这一思想打算建立一种跨学科的科学，“即从更一般的意义上制定出适于各种系统的原理和模型，而不讨论它们的特殊种类、元素的及所包含的各种力”。

从三十年代末起，贝塔朗菲就开始从机体生物学转向建立一般系统理论。1945年他发表《关于一般系统论》，这可以看作是他创立一般系统论的宣言。他认为，一般系统论要研究各种系统的一般方面、一致性和同构性，要阐述和导出适用于一般系统或其子系统的模型、原理和规律。他主要研究了机体系统、开放系统和动态系统的理论，试图以机体系统理论解释生命的本质。他还把开放系统作为系统的一般情形，全面考虑了开放系统的输入、输出和状态等基本因素，科学地解释了与开放系统有关的稳态、等终极以及有序性的增加等问题。关于动态系统，他在用一组联立微分方程来定义一个动态系统的基础上，通过设定各种约束条件，从数学上描述了系统的各种性质，如整体性、加和性、竞争性、机械性、集中性、终极性、等终极性等。所有这些工作，为他的一般系统论奠定了理论基础。

二、信息论的产生与发展

一般认为，信息论是研究信息的实质，并用数学方法研究信息的计量、传递、变换和贮存的一门学科。就本来的意义上讲，信息论是通信理论中研究编码的一个分支。信息论的独特之处就在于对所获得的信息量使用了数学的量度。

^① 贝塔朗菲：《一般系统论的基础、发展和应用》，1968年英文版，第187页。

早在 1832 年，莫尔斯就发明了高效率的“点一划”电报码，即莫尔斯码。莫尔斯利用人们对英语字母出现概率的统计，出现次数越多的字母（如“e”）他规定的符号越简单，这就节约了通信的时间，提高了通信效率。1928 年美国的尼奎斯特和德国的屈普夫米勒几乎同时独立发现，要以一定的速度传递电报信号，就要求有一定的频带宽度。这说明传递消息的速度与设备条件有关，不能随意增加。1928 年，美国物理学家哈特利（1888—1959）进一步证明，传递一定量的信息，要有一定的“带宽×时间”的积。他指出，从 S 个符号或编码中选出 N 个符号组成一则消息共有 S^N 个可能性，这样最合理的就是把信息量 H 定义为符号或编码数 S 的对数，即 $H = N \log S$ 。哈特利的这个理论可以看作是现代信息通信理论的起源。1936 年，阿姆斯特朗提出用增大传输带宽来抑制噪声和干扰。这些工作都已接触到信息论提高通信的可靠性和效率的中心课题。

第二次世界大战对通信的实际需要，使得建立通信理论的要求更加迫切。1948 年，美国应用数学家申农发表《通信的数学理论》，标志着信息论的诞生。

申农第一次从理论上阐明了通信的基本问题，他认为“通信的基本问题就是精确地或近似地在一端复现另一端选择的信号”。通信就是将信息由发信者（信源）传给受信者（信宿）。他撇开具体的通信系统，只考虑消息的形式而不管它的内容，把通信的语义方面的问题和技术方面的问题区分开来，从而提出了一个一般通信过程的系统模型。其次，申农提出了度量信息量的数学公式。他把消息看作随机序列，把这种离散信源看作“马尔科夫过程”，认为信源是根据已知的（或某种意义上可知的）概率

从各种可能的消息中选择消息发出去的。他用马尔科夫过程的统计特性即它的“熵”来表征信源的特性，将它定义为该信源发送每个消息(符号)的平均信息量，等于该符号出现的概率的对数乘以其概率之积的总和。第三，申农从理论上说明了有噪声信道在一定条件下可以可靠地工作，并指出了这样做的极限。他的研究指出，无噪声和有噪声信道都有一个信道容量。即使有噪声的信道，只要信源产生信息的速度小于信道容量，该信源的消息就可能以任意小的差错率通过此信道传输；否则消息就不可能无误差地通过信道传输，而必然发生一定的差错。他确定，信道容量是信道能几乎无误差地传送信息的最大速度。这是申农的“信道定理”。

对信息论的建立作出卓越贡献的还有维纳等人。维纳在《平稳时间序列的外推、内插和平滑化》与《控制论》两本名著中，也把消息看作可测事件的时间序列，把通信看作统计问题，并类似地用“熵”来定义了连续信号的信息量。苏联数学家柯尔莫哥洛夫和英国统计学家费谢尔也先后提出了类似的想法。

和申农合著《通信的数学理论》一书的美国学者韦弗认为通信应包括三个方面的问题：(1)技术问题，即怎样使传送的符号精确传送通信符号；(2)语义问题，即怎样使传送的符号精确表达语义；(3)有效性问题，即怎样使受信者收到语义后，按需要的方式有效地发挥作用。而申农的工作只属于技术问题，他没能解决有关语义和有效性问题。近十多年来，信息论在这两方面都有了新的发展。1971年高艾斯等人提出了“有效信息”的概念。1978年夏尔马等人提出了非可加性的“广义有效信息”概念。此外还有人提出“语义信息”、“无概率(主观)信息”以及“相

对信息”等等。随着模糊数学的出现，为适应图像识别和视觉问题发展的需要，又产生了“模糊信息论”等等。

三、控制论的产生与发展

几乎在信息论产生的同时，控制论也出现了。

控制论是把自动调节、通讯工程、计算机和计算技术以及神经生理学和病理学等等学科以数学为纽带联系在一起，在相互渗透的基础上形成的新学科。它撇开机器、生物以及社会的具体构造的特性，研究它们作为控制系统的共同规律和方法。

控制论的奠基人是美国科学家维纳。早在 1919 年，他就开始接触到控制论思想了。第一次世界大战以后，飞机速度越来越快，人工操纵高射炮的反应很难跟上，命中率降低，必须采用自动控制装置。这种装置要解决两个问题，一是预测飞机的飞行方向和速度，二是要找到一种机械方法来模拟炮手的行为，以尽量减少人和其他偶然因素的影响。对于第一个问题，维纳是用统计观点处理的，即他给出了从时间序列的过去数据推知未来或预测未来的方法，建立了维纳滤波理论。他还把控制和通讯统一起来处理，从更广的意义上理解信息，把信息看作是“我们对外界进行调节，并使我们的调节为外界所了解时而从外界交换的东西”，^① 把信息作为研究控制和通信过程的关键因素。第二个问题的解决，必须采用负反馈。负反馈把系统或装置输出的状态或行为的信息送回输入端去，产生控制作用，以减少系统状态和规定状态的偏差。为此维纳研究了负反馈原理。

^① 维纳：《人有人的用处》，商务印书馆 1978 年版，第 9 页。

信息和反馈是火炮控制装置的两大问题，也是控制论思想的核心。为了把这个问题深入下去，维纳与病理学家罗森勃吕特等人合作，研究了小脑损伤而引起的目的性震颤病人的行为，指出病人在试图完成某种动作时而出现的震颤是由于神经系统的损伤，反馈紊乱的结果。1943年，维纳和罗森勃吕特、别格罗合写了《行为、目的和目的论》一文，从“随意活动中的一个极端重要的因素是反馈作用”这个前提出发，用负反馈定义了目的性行为，认为“一切有目的行为都可看作需要负反馈的行为”，从而一切有目的的行为，都可借助负反馈的不断校正来实现。这样就可以把动物的行为模拟到机器上来了。这是第一篇关于控制论思想的论文。论文发表后，引起了广泛的重视，冯·诺伊曼等人经常与维纳交换意见。1943年底，维纳主持在普林斯顿召开的讨论会，各学科和专业的专家对信息和控制问题发表了自己的看法。1946年，在纽约又召开了反馈问题讨论班。以后定期进行讨论，逐渐形成了一个共同关心的问题，这就是通信和控制问题，特别是信息和反馈问题，形成了共同的术语和思想，产生了一门新学科。在这种情况下，维纳总结了这些思想，1948年出版了《控制论》，把这门新学科定义为“关于机器和生物的通信和控制的科学”，宣告了这个学科的诞生。

1954年，控制论创始人之一、英国生物学家艾什比发表了《大脑设计》一书，标志着控制论研究向各方面深入发展的第二个阶段。五、六十年代生物控制论的研究是较为成功的领域之一。继坎农之后对生物稳态的研究，艾什比提出了稳态机能在外界条件发生变化时自我调节以适应其变化，保持状态的稳定。对血压、呼吸、体温等生理调节系统的研究，加深了对生命活动的

认识。以后生物控制论扩大到生态系统的研究和各种脑模型感知器的研究。生物控制论的研究推动了仿生学和更精巧的自动控制装置的研制,也推动了自适应、自学习、自组织、自繁殖系统的研究。

工程控制论是较为活跃的另一个控制论分支。它是在控制论的基本概念和方法以及伯德的反馈放大器理论、尼奎斯特的伺服机理论相结合的基础上产生的。1954年钱学森在美国发表《工程控制论》一书为这门学科奠定了理论基础。五十年代的工程控制论以自动调节为基础,以反馈为核心,主要解决单一对象和单参数和自动调节系统的稳定性问题,采用建立在传递函数或频率特性上的动态系统分析和综合方法,这就是所谓“经典控制论”。

从五十年代末、六十年代初开始,由于解决导弹、空间技术控制问题的需要,提出了多输入、多输出、高精度和参数时变系统的分析和设计的课题,以往的经典控制理论对此已不能满足需要。六十年代初,美国的卡尔曼在维纳工作的基础上,引进了数学计算方法中的“校正”概念和量子力学与稳定性理论中的“状态空间”概念,并吸取了五十年代“最优化”研究的成果,于1960年国际自动控制联合会第一届大会上发表了《控制系统的一般理论》,接着又相继发表了《线性估计和辨识问题的新结果》等论文,揭示了复杂系统实现最优性能指标的控制规律,形成了以系统辨识、最优滤波、最优控制为主要内容的现代控制理论,推动工程控制迈进了以电子计算机为核心的最优控制阶段。

七十年代以来,随着科学技术的发展和社会的进步,现代的工业、电力、交通、生物、生态以及军事指挥等大规模的生产和管

理系统越来越多,日益复杂。同时,由于生产过程向综合自动化发展,电子计算机的广泛应用,需要控制的过程又历史地跨进了工程的或社会的大系统中。这些系统规模大、结构庞杂、功能综合、因素众多,对这种大规模复杂系统评价、设计、控制与管理,只能求助于运用系统工程学的方法等,对其实施系统控制。这就带来了控制思想、手段、方法的演变,推动了工程控制论向着广度和深度发展,跨进到大系统的最优控制与管理的新阶段。

大系统通常具有三个特点,即:信息的采集和处理量大面广;系统的多级结构模型;以及集中与分散的控制方式。适应于这种情况,大系统理论和以系统模型化、最优化、信息处理等为核心的系统工程学方法紧密结合,它着重从控制与信息观点,研究各种大系统的结构方案,总体设计中的“分解”方法和协调等问题。大系统理论的产生,从另一个侧面反映出自动控制的技术科学已进入控制与信息科学、经济管理科学,生物与环境科学等各种不同学科领域相互渗透的阶段。由于此,有人把大系统理论称为“第三代”控制理论。

六十年代以后,智能控制或人工智能,也得到了迅速的发展。智能控制是研究与模拟人类智能活动及其控制与信息传递过程的规律,研制具有某些仿人智能的工程控制与信息处理系统的一个新兴分支学科。它在控制论、信息论、计算机学科、神经生理学、实验心理学、仿生学等有关学科互相渗透的基础上,汇集各有关方面的研究成果进行综合性研究,成为自动化技术科学向纵深发展的标志之一。六十年代后期具有简单智能的机器人问世。七十年代对机器人的研究着重在环境的识别,对行

为的决策及通过自然语言与人对话等。目前正在开展视觉、触觉等传感技术、人工智能、新一代电脑及其软件等方面的研究工作，预计在八十年代末和九十年代都将会有所突破。

四、系统工程学的兴起和发展

系统工程学是系统科学的一个应用分支学科，它的兴起是与管理科学的进一步发展，与信息论、控制论及电子计算机的出现相联系着的，也是和战争与生产实践迅速发展的需要联系着的。

四十年代开始，在美国、丹麦等国家的电讯工业部门中，为完成巨大规模的复杂工程和科学研究及生产任务，开始运用系统观点和方法处理问题。美国贝尔电话公司在发展微波通讯网络时，按工程的时间和顺序把工作划分为规划、研究、发展、发展中的研究和通用工程等五个阶段，这是一套系统工程的方法。这个公司首创了系统工程学的名称。以后其他公司也开始运用系统方法并获得成功，为系统工程学理论体系的形成准备了条件。

另一方面，由于军事的需要，大规模军事系统开始作为一种科学来研究，运筹学得到了广泛的应用和发展。运筹学是系统科学的基础，它是一门综合性的数学学科。其目的是根据问题的要求，通过数学的分析与运算，作出综合性的合理安排，以达到较经济、较有效地使用人力物力，即在给定的约束条件下，达到最优的效果。早在第一次世界大战期间，英国就曾试图对敌方火力作定量的数学分析，以确定作战部署。第二次世界大战时期，大规模的激烈战争行动，要求用最新的技术、以最短的时间生产最大量的新武器系统，并最有效地在战场上使用。这样

一来,按照传统的方法就显得不适应,必须精密地、统盘地组织各个相互联系的工作过程,即系统地研究如何解决从武器制造到军事指挥系统以及后勤系统的组织问题。这种用数量表示经济活动和军事活动中有关运用、筹划、管理的问题,就形成了运筹学这个专门的学科。

第二次世界大战中,英国为防御德国空袭而发展的雷达报警系统,促进和发展了运筹学。大战爆发不久,英国组织了一个以罗威为首的研究小组,研究新型雷达早期警报探测系统,接着又发展成为分析夜间作战的各种局面,这种研究后来成为作战研究或运筹学的样板。由于英国空军在调度战斗机和驾驶员执行战斗任务时使用了运筹学,在力量使用上取得了对付德国轰炸机的最大获胜几率;海军用在反潜战斗中计划和调度搜索——摧毁任务;陆军方面的应用集中在防空问题以及对野战武器轰击效果的研究方面。美国在第二次世界大战期间应用运筹学最显著的成就是在日本海域作有效的布雷;美国海军反潜战斗运筹学教研组采用空中布雷战术以有限数量的水雷取得了最大的战绩。

由于运筹学在战争期间立下了功劳,战后人们把它应用到经营管理和其他方面,并逐渐形成一门完整的学科。它的任务就是探索在一些确定或不确定的条件下,使研究对象的目标函数有最优解的方法和程序。1948年,美国麻省理工学院开设了第一门运筹学课。1949年美国第一本运筹学刊物——《非军用运筹学专刊》由美国运筹学委员会出版发行,一年以后美国正式成立运筹学会。

1957年,美国密执安大学的古德和麦克霍尔合著《系统工

程学》一书，系统地论述了线性规划、排队论、决策论等运筹学分支，为系统工程初步奠定了基础。同时，系统工程的实践也取得了很大发展。1956年，美国杜邦公司在兰德公司的合作下，研究出一种协调庞大企业内部许多不同部门间工作的方法——“关键路线法”。一年以后，美国海军又将它进一步发展成“计划评审技术”，并成功地应用于研制“北极星导弹”，使其提前两年完成。

六十年代初，美国电气工程师学会在科学与电子部门设立了系统科学委员会，1965年，麦克霍尔编写了《系统工程手册》，论述了系统工程的方法论、系统环境、系统元件、系统理论、系统技术、系统数学等，基本上概括了系统工程学的各个方面，使之成为一个较完整的体系。一般认为至此系统工程已形成一门学科。

运筹学和系统分析(或系统工程)既可以看成同一学科在不同历史阶段上的表现，也可以看成是属于同一个领域中的两个姐妹学科，都是系统思想方法定量化的实际应用研究。按照钱学森的看法，运筹学的目的在于增加现有系统效率的分析工作；系统分析主要指对若干可供选择的执行特定任务的系统方案进行选择比较^①。系统工程是指设计新系统的科学方法。系统工程采用的方法是把系统各个组成部分综合起来，研究它们之间的相互关系，研究各个局部对整体的影响，同时把这个系统作为更大系统的一个局部，从社会——技术、社会——经济等角度进行考察，规划和设计大系统，使整个工程达到综合平衡、性能

^① 钱学森等：《论系统工程》，湖南科技出版社1982年版，第7—27页。

起来的系统自组织理论。

系统自组织理论是一种关于系统演化发展的一般性理论。它不同于传统的静态平衡理论，突破了把静态平衡作为追求目标的狭隘眼界，从而为理解复杂系统的生机奥秘提供了一个科学的根据。对于这方面的研究，国际上有很多学派，其中影响较大的有比利时普利高津的耗散结构理论、联邦德国哈肯的协同学和艾根的超循环理论，以及近年来发展起来的混沌理论、重正化方法等等。这部分内容我们将在第九章和其他有关章节介绍，此处从略。

以上各种理论，虽属不同领域，所使用的范畴和方法也不尽相同，但都涉及了一个最基本的范畴——系统及其机理，正是在这个契合点上，这些理论从不同方面，用不同手段，共同建造了一门新学科。系统科学这个耸立于现代科学技术之林的雄伟大厦，就是在这些理论的基地上诞生的。

第三节 系统科学的研究对象、性质和体系

一、系统科学的研究对象

每一门科学都有自己的研究对象。一般地说，每一门科学所研究的对象都是一个或一些特定的系统。比如，天文学研究的是太阳系、恒星系、银河系、星系以至总星系；生物学研究的是生命系统，是各种不同层次的生物系统或生物的各个层次上的系统；物理学研究的是作为物理现象的宏观的、中观的、微观的各类物质系统；等等。但是所有这些学科并不研究离开具体的

物质形态的一般系统。系统科学则不同，它不研究特定形态的、具体的系统，而是撇开系统的具体形态，特定的结构和功能，研究一般的系统，研究系统的类型、性质，以及运动的机理和规律。

首先，系统科学所感兴趣的不是某个特定领域的具体的结构、功能、性质和机理，而是作为一般系统的共同的规律性、一致性和同构性。其次，系统科学并不是把它研究的对象作为纯客观的实体，孤立地、静止地把握它。因此，可以这样说，系统科学是一种观察问题的方式。作为它的研究对象，不但系统本身各个要素的联系、要素和系统的联系，而且系统和环境的各种联系、现在的联系和状态与未来的联系和状态等等，都被纳入了考察问题的参考系之中。

贝塔朗非在谈到一般系统论的对象和性质时认为，各种经典科学（无论是化学、生物学、心理学，还是社会科学）都是试图将整体的各个元素加以单独处理——如化学元素、酶、细胞、初始感觉以及自由个体等等——并以期通过在观念上或试验中把它们重新凑到一起的方式，找出可以理解的对象整体或系统（如细胞、精神和社会等）。而现在，我们已经认识到，对研究对象的理解不仅仅需要它们的元素，更重要的是要弄清楚它们之间的关系，例如，细胞里各种酶之间或精神中许多有意识和下意识之间的相互作用，以及社会系统之间的结构和动力等等，这就要求我们对许多业已观察到的整体从其本来的特性上加以重新考察。而且，这种考察还要表明，在“系统”的某些共同方面存在着一致性和同构性，虽然上述类似性或同构性常常显现在其他方面完全不同的系统之中。这便是—般系统论所要研究的领域。^①

① 参见贝塔朗非为拉兹洛《系统、结构和经验》（英文版）一书所写的序。

系统整体存在着多种形式,有机械的、物理的、化学的、生命的和社会的,等等。它们形态各异,性质也截然不同。决定整体及其性质的不仅是由于构成它们的基质——要素不同,而且在很大程度上取决构成整体的各个部分(要素)之间的相互作用与相互关系。如果由各个部分相互作用、相互关系而形成了整体,那么,相应地,也形成了超出每部分性质简单相加的某种整体的性质。一般系统论就是要研究这种系统整体性形成的机理和规律性。

〔系统中还有一些特殊的形式,这些系统在和环境进行物质、能量和信息的交换过程中,既能通过调节保持自身的稳定状态,又可以进行要素和结构的重新组合,从而产生新的功能,以适应环境的变化,这就是系统的自适应、自稳定、自组织、自控制。例如生命系统和社会系统中就存在这样一类十分显著的特点,即当外界环境发生变化,系统能通过改变自己的行为方式甚至改变自己的结构,而继续“维持生存”的现象。这种现象就是生命系统和社会系统对环境变化而表现出来的“适应性”。这种适应性是通过反馈、调节等控制手段实现的。这种具有反馈调节能力,能够实现自组织、自稳定、自适应的系统就是功能系统。系统科学中的一个重要学科——控制论就是研究存在于生物界、社会组织 and 某些机器中的功能系统的内部结构及其相互关系,研究它们作为控制系统和信息系统的共同规律和控制方法的。〕

还有一种大系统,它们通常是规模庞大,子系统众多,组成要素复杂,影响广泛,并伴随有各种不确定因素(特别是人的因素)和对立因素的交叉、渗透和影响,具有多级复杂的结构和功能(包括人的目标)的系统。其中部分大系统行为的条件和内容

很难予以定量描述,或不是以数量作为主要信息特征,称之为非定量性的大系统。在自然界和人类社会中,都存在众多的大系统。例如一个联合企业、一个城市,一个地区可以是大系统;地球上的矿藏系统、海洋系统、生态系统是一个大系统;一个人的大脑、一个国家的交通体系、教育体系、产业结构也是大系统。系统科学中的大系统理论就是研究这些大系统的性质、结构和一般运动规律,提供关于大系统的理论基础和对大系统进行预测、决策和管理的理论工具。

总之,系统科学是以系统及其机理为研究对象,研究系统的类型、一般性质和运动规律的科学。通过这种研究为人们提供认识现实世界中各类系统的性质和特点的理论依据,以便按照人的目的和需要在改造、创建各种系统中进行科学的设计、管理、预测和决策。

二、系统科学的性质

系统科学研究对象的复杂性和研究领域的广泛性,决定了系统科学的特殊性质。这就是它的横向学科性质、综合性质、功能行为性质和方法论性质。

系统科学的横向学科性质

系统科学不同于研究自然界某一(或某些)物质运动形式的自然科学,例如,系统论或信息论很难说是属于物理、化学、生物学或是这些学科内容的叠加。它反映的是自然界各个领域和各部门自然科学中共同的东西,也反映社会生活各个领域某些共同的东西,它所研究的系统结构的规定性、系统的类型、机理和运动规律贯穿在自然界和社会各个领域的系统之中。不论是物

理世界、生命世界、工程技术和社会组织，都存在着具有一定结构和功能的系统，都有系统的动态演化，也都有系统的信息传递和控制过程。系统科学的概念、理论、方法，是从各个领域和各门科学的研究成果中抽象、概括出来的。系统科学正是基于各门学科，又撇开各种事物、现象、过程的具体特性，撇开各类系统的具体内容，用抽象的方法研究它们的共同方面、一致性和同型性，即系统结构的最一般的规定性、类型、动态机理和运动规律的。

例如，信息论研究信息的计量、传输、处理、变换、贮存，所涉及的范围非常广泛，有作为技术信息的电子计算机程序，有作为生物信息的遗传密码，有作为社会信息的人类的语言等等。当信息论研究信息的实质和特征时，自然会体现出对所有各个领域信息的概括和抽象。比如，当把信息理解为一切有意义的信号时，就具有广阔的覆盖性质。声音、颜色、气味、自然景物是信息，语言、文字、图像也是信息。这就是它的横向性。

控制论所研究的是以信息反馈机制为核心的系统调节和控制的规律，这种机制和规律在生命现象、人类社会、机器系统、思维 and 一切自组织和自稳态的功能系统中都是普遍存在的。

系统论研究和分析各式各样系统的共同特性，找出适用于一切系统的一般模式、原则和规律，并对这些一般性质进行数学描述。

系统科学虽然没有哲学那样高的普遍性和世界观的意义，但是，由于它的横向学科性质，从某一侧面揭示了客观世界和人类知识中共同性的东西，从而能够在各个学科、各个领域发挥它的方法论作用。

系统科学的综合性质

系统科学的综合性质，首先表现在它在研究方法上综合融汇了各个领域、各门科学的研究方法和方式，在这里既有严格精确的定量描述，也有哲学的、经验的定性分析；既有逻辑的、抽象的方法，也有直观的形象的表达；既有对客观规律的严格遵循，也有根据人的需要而采取的人为的创造和约束；既有现代的数学模型，也有传统的类比。诸如此类不可胜数。它综合了人类认识世界和改造世界的历史发展中所建树的重要方法与手段。

其次，系统科学的综合性质还表现在，它从方法论的侧面把各门科学整合、融汇、沟通起来，从而使它具有大科学或整体科学的特点。系统科学的综合性是与现代科学的综合化、整体化、一体化的趋势相适应的。它反映了科学理论在形式结构上和方法论上的一致性和统一性。系统科学的各个学科，特别是系统论、控制论和信息论，正是从不同方面起了这种综合和统一的作用。例如，系统论既综合了各门科学的整合的功能，又从形式结构方面把各门科学整合起来；控制论既综合了人类各门知识发展过程中的反馈控制的机制，也为各门科学在实践中应用提供了参与、融汇、调节的方法论依据；信息论所研究的信息过程既是对各类知识、概念、范畴、公理、定律等等的运演过程的综合与概括，也为各门科学知识的沟通提供了科学的方法与手段。因此，系统科学虽然不是“大一统”的科学，但却具有某种意义上的综合科学或“大科学”的性质。

系统科学的功能行为性质

系统科学就其本质，可以说是研究事物的功能行为的。也就

是说,它主要不是研究“这是什么?”而研究“它做什么”和“怎样做”的问题。它并不把客观事物作为纯粹的实体,深究其基质构成及其发展变化的原因,而在运动发展的过程中,在动态中研究它的功能行为。至于它的研究对象的实体是什么,物理、化学的规律是否适用,却无关宏旨。所以它所注重的是动态的方法,功能行为的方法。

系统科学的功能行为性质还表现在,它的很多分支学科,特别是应用学科,例如系统工程、运筹学、工程控制论等等,所侧重研究的主要不是“物理”,而是“事理”,不是单纯自然的、“物理”的联系,而是包含着人的因素的“事理”的联系。作为系统科学的一个分支学科——事理学,就是定量地研究特定的政治、经济、军事和社会事务或过程的基础理论。这种事理本身就带有很大的行为的和人为的性质。在现代社会里,没有人参与的单纯自然系统的功能是不能满足人的需要的。系统科学的产生,人们研究各类系统的目的,就是为了寻求在人的参与下变革系统的结构,形成有利于人的系统功能的条件、程度和界限。就此而论,也可以说,系统科学具有一定程度的“人为科学”的性质。

系统科学的方法论性质

由于系统科学的横向学科性质,综合性质,功能行为的性质,可以看到它虽然不是哲学方法论,却具有一般方法论的意义。系统科学不论它的基本原理还是它的各分支学科的具体方法(如信息方法、反馈控制方法、系统分析方法等等)原则上都是作为一种思维方法而提出的。美国系统哲学创始人之一拉兹洛认为系统科学为我们提供一种“透视眼光”,我们可以用这种眼

光看人和自然。“这是一种根据系统概念、根据系统的性质和关系,把现有的发现有机地组织起来的模型。”^①

拉兹洛认为,在西方科学史上,曾经存在着原子论的思维方式和整体论的思维方式的交替出现的局面。早期的科学思维既是整体的又是思辨的;近代科学的崇高精神是依靠经验而又是原子论的思维方式的达到的。这两种思维方式都难免有不足之处;前一种用信念和洞察代替了详实的探求;后一种牺牲了融会贯通以换取条分缕析。今天,我们还目睹另一场思维方式的转换:转向严谨精细而又是整体论的理论。这就是说,要构成拥有它们自己的性质和关系集成的集合体,按照同整体联系在一起的事实和事件来思考,用这种集成的关系集合体来看世界就形成了系统观点。这就是现代的思维方式的。也是继原子论、机械论和未经协调的专业化三种思维方式之后的思维方式。这种思维方式就是与系统科学联系着的,主要是由系统科学提供的。

系统科学的方法论性质,首先表现在它的基本原理和方法总的都是从系统观点出发的,即着重从整体与要素之间、整体与外部环境之间的相互联系、相互作用中,既综合又精确地考察对象,并定量地处理它们之间的关系,以达到最优化处理问题和解决问题的目的。系统科学各种理论中所包含的方法,如一般系统论(数学意义上的)、控制论、信息论、集合论、图论、网络理论、博弈论和决策论等等,都具有一般方法论的意义。

其次,系统科学为我们提供的是有机的、能动的或功能性的

① 拉兹洛:《用系统论的观点看世界》,中国社会科学出版社 1985 年版,第 14 页。

系统,充分体现了系统的目的性、选择性。系统论、控制论告诉我们,与牛顿力学中那种没有结构、没有内部外部之分的质点不同,作为系统存在的事物都是结构—功能的统一体;系统自身的结构和功能的存在,使得环境不能直接决定事物的变化,而必须以事物自身为中介。系统中的约束信息——即有一定程度的目的和组织的信息——的存在,不仅可以“记忆”过去的经验,把它贮存在自身结构中,通过它来调节、协调系统的行为和各部分的关系,甚至能对环境作出“超前反应”。这样,系统就能使外界环境对它们内部环境(表现为状态)的影响缩小到最小程度,从而在变化多端的环境中保持自身质的规定性,保持内部条件的稳定。对于复杂系统来说,这种稳定性调节能够扩大到外部环境——以致改变和组织外部环境去适应自己的内部结构。正是系统的这种功能特性赋予系统以相对的独立性、选择性和主动性。

第三,系统科学提供了一套具有哲学意义和方法论意义的概念和范畴。系统、信息、熵、控制、反馈、稳态、功能、结构、涨落等等,这些概念和范畴是人们长期对系统的各种联系和关系认识的成果,是对系统各个方面的本质所作的概括和反映。列宁说:“范畴是区分过程中的一些小阶段,即认识世界过程中的一些小阶段,是帮助我们认识和掌握自然现象之网的网上纽结”。^①系统科学这些范畴的出现本身就标志着人们对世界的认识已经进入一个新的阶段,即从存在到演化,从实体到关系,从对实体和属性的认识到对功能和价值的认识的新阶段。它们是

^① 《列宁全集》,第38卷,第90页。

今天人们认识和掌握自然和社会之网的网上组结。其中许多范畴,例如系统、信息、结构、功能、熵等等事实上已经具有普遍的、世界观和方法论的意义,成为现代哲学不可缺少的基本范畴。人们正是运用这些范畴认识客观事物的系统性质,为人们进一步变革系统提供了科学的思路、合理的途径和有效的方法。

例如,“熵”这个概念是1865年德国科学家克劳修斯在讨论热循环时首次引入的,当初他只把熵作为表达热力学第二定律的一个概念;熵作为“分子无序”的量度,第二定律也可以说是熵增加定律。以后,经过许多科学家的研究,特别是玻尔兹曼在统计力学方面和申农在信息论方面赋予了熵以新的内容。现在熵已经在远离热力学的领域,诸如概率论、数论、信息论、语言学、生物学、生态学和环境科学以及许多社会现象中得到了运用。美国经济学家布尔丁还把熵概念引进到社会领域,提出一套“组织化理论”。布尔丁认为,生产是进化,是以形成高熵“废物”为代价而造出高度有序的低熵产品。消费意味着向无序退化,是增熵过程。矿石变成钢铁、小麦成为面包,当然是更趋于有序;而机器变成锈铁,面包变成粪便,无疑是增熵。近年来,比利时的科学家普利高津经过长期对非平衡态热力学和统计物理学的研究,就是用熵、有序、无序、耗散、涨落等概念来解释生物高分子的结构和功能、新陈代谢、生长发育等生命现象,提出了“耗散结构”理论的。可见,象熵这样的概念对于扩大人们认识的领域,强化人们认识的能力,是有着十分重要意义的。

除此之外,系统科学的方法论性质还表现在它提供了一系列认识世界和改造世界的具体的、科学的方法与技术。关于这些方法与技术,我们将在以后的章节再作论述。

三、系统科学的体系

几十年来，系统科学无论在理论上还是实践上都取得了巨大成就。各门分支学科尤其发展迅速，控制论、信息论、系统工程和一般系统论等大体上都经过了一个从经典理论到现代理论的发展过程。各个分支在不同层次上也都取得了很丰富的成果。但是，也不能不看到，作为一个独立学科的门类，系统科学还很年轻，很不成熟，还有待进一步探究和完善。

一般系统论创始人贝塔朗菲晚年在其《一般系统论的历史和现状》一文中，曾提出了一般系统论研究的几个方面，实际上为系统科学的体系提出了一个初步设想。他认为系统科学包括三个主要的研究方面。

第一个方面他称为“关于‘系统’的科学”，即对各种不同的具体科学（物理学、生物学、心理学、社会科学）的系统进行科学的理论研究和作为适用于一切（或一定的）种类的系统的根本学说——一般系统论。用这个方法研究宇宙中的大量现实系统，找出各个“系统”的一般方面、一致性和同态性；特别是研究系统的“整体”和“完整性”等概念、模式和原则，以便为科学的统一提供一种可能的途径。这里还要着重运用数学的语言和严格的演绎方法，建立数学系统论，研究系统方法论。系统论方法包括数学系统论、控制论、自动化理论、控制理论、信息论、集合论、图论、网络理论、关系数学、博弈论与决策论、电子计算机化、模拟等等。

第二个方面是系统技术。既包括系统技术的“纯粹”科学，如控制和信息理论，博弈论和决策论，线路理论等；也包括应用学

科,如动态系统理论、工程控制论等。

第三个方面是系统哲学。包括:一、系统本体论。诸如说明“系统是什么”,“各种系统”在被观察的世界的各级水平上是怎样体现的等等。二、系统认识论。研究带有多项变量的有组织整体,要求相互作用、调整、组织、目的论等这样一些新范畴,这里将提出很多新的认识论、数学模拟和数学工具方面的问题。三、研究人与世界的关系,这就是人本主义和价值观。

这是一个庞大的系统科学和系统哲学的大体系。尽管显得过于庞杂,并且没有把关于系统的科学与系统的哲学区分开来,但他对系统科学体系的建立提出了富有探索性和启发性的构思,这是贝塔朗非对系统科学贡献的一个重要方面。

近年来,我国著名科学家钱学森,对于系统科学体系作了大量研究,发表了一系列论文,提出了一套有独到之处的见解,为系统科学体系的建立作出了有影响的贡献。

钱学森认为系统科学是与自然科学、社会科学等相并行的一个学科门类或学科群,它包含三个层次,这就是系统的工程技术层次——各门系统工程、自动化技术和通讯技术;系统的技术科学层次——控制论、信息论、运筹学;系统的基础科学层次——系统学。除此之外,还有一个系统科学与马克思主义哲学之间的桥梁,即系统观或系统论。钱学森的系统科学体系与他的科学体系的总体思想是一致的,他把各个门类的科学都看作是由三个层次构成的,即工程技术、技术科学和基础科学,再上去就是哲学领域。其次,他把系统论、控制论、信息论以及各种自组织理论都统一起来,摒弃了流行的所谓“老三论”、“新三论”的各种说法,把系统科学看成是统一的整体。

我们吸收了贝塔朗非和钱学森关于系统科学体系的思想，并根据近年来国内外关于系统科学研究的新成果，认为系统科学应当包括以下三个方面。

（一）系统学

这是系统科学的基础理论，它研究一般系统的基本概念，基本性质，以及系统进化的一般规律。其中包括研究一般系统的基本概念和性质的系统概念论；研究适用于各种具体系统的一般演化模式和规律的系统进化论；研究系统的一般性质和在实践中所遵循的原则的系统性原理。

（二）系统科学方法论

系统科学方法论是根据系统科学的基本概念和基本原理研究系统方法的理论。其内容：系统方法的构成，包括结构方法、功能方法、历史方法等；系统方法的基本原则，诸如整体性原则，相关性原则，综合性原则，目的性原则，层次性原则，历时原则等；系统科学的方法论学科和有关方法，包括信息论、控制论、系统动力学、大系统理论、灰色系统理论、模糊系统理论、突变理论、泛系方法论等等。

（三）系统工程学

系统工程学是系统科学的应用学科，它是系统科学的方法论、运筹学以及信息技术、计算技术，特别是电子计算机相结合的产物。系统工程学的目的在于研究和建立最优化系统。系统工程学除包括控制论、信息论的某些方法和技术外，还包括运筹学以及各门系统工程等等。

第四节 系统科学的地位和作用

一、系统科学在现代科学技术中的地位

现代科学技术象一座宏伟的大厦，是人类长期以来在认识世界和改造世界的过程中，用不断积累起来的知识构造起来的。现代科学技术已不再是各不相干的知识领域，而是一个层次分明、结构完整的宏大体系。如果我们对当代科学技术体系再作具体地分析，不难看出，当今各门类基础科学中，起主导作用的、最基本的应该是自然科学、数学科学、系统科学和社会科学这四大门类。系统科学不仅在整个科学技术体系中占有重要的地位，成为当今人类知识大厦的重要基础之一，而且系统科学的概念、理论、原则和方法日益渗透到科学技术体系的各个层次、各个领域，成为现代科学技术整体化、综合化趋势的重要桥梁和工具。

二、系统科学与自然科学、社会科学和工程技术的关系

现代科学和技术的整体化的不断增强，乃是现阶段科学进步的重要特点。科学知识整体化既表现在各个科学领域内部成份之间的综合、联系及其相互作用的加强，也表现在科学知识不同领域之间、不同学科之间的综合、联系相互作用的加强，表现在认识方法的相互渗透和相互补充。而系统科学的概念、范畴和方法正是在这种相互渗透和相互作用中，发挥了重要的作用。

在社会科学中,由于现代社会科学综合化、数学化趋势,思维方式和研究方式也越来越现代化。过去那种不同学科、不同领域孤立地提出问题和解决问题的思维方式已不可能全面地认识 and 解决今天社会科学所面临的问题。现代社会科学的发展正象自然科学一样,所提出的问题往往突破传统的学科彼此划分的界限,涉及到不同学科、不同领域,甚至超出社会科学的界限而涉及到自然科学和技术领域。这种情况在哲学、经济、法律、历史、语言等领域都普遍地存在着。例如,现代语言学、现代管理学、人口学所面临的问题,已经不单纯是传统意义上的社会科学的问题,也不可能仅靠传统逻辑定性的分析所能解决了的。现代社会科学必须适应这种综合性质的课题和要求,树立整体观点、系统观点。就是说,要认识问题本身的复杂性、跨学科性,把所研究的问题作为一个系统,分析其内在的方面、要素及关系;要认识这个问题与其他问题的相互关系,把这个问题当作更大系统的一个子系统;还要有相适合的系统分析的方法和价值标准。人们在不同学科、不同领域对问题的考察是为了进一步更好地对问题作综合考察,局部的最优化是为了最终实现全局的最优化。还应当看到,随着数学的发展和现代社会科学关于研究对象和问题的量的方面的认识,数学方法也越来越渗透到社会科学的各个领域。思考、计量、决策的不可分割性将是我们这个时代思维方式的一个重要特点。

正是在这种形势下,系统科学与社会科学的关系越来越密切,为社会科学提供了有效的思维方式与方法。近年来,人们可以从国内外的社会科学著作中,越来越多地看到诸如系统、要素、结构、功能、反馈、最优化、信息、秩序、组织、负熵、行为、稳态

等等概念和范畴。社会生活系统、人类对社会生活的认识和实践的系统,都是客观存在着的信息系统和控制过程的复杂系统,它们本来就是控制论、信息论、系统论研究的对象。社会科学在研究这些复杂系统时,把系统科学的这些分支学科中具有方法论意义的概念、范畴和思维方式作为工具引进来,这不仅是自然的、可行的,而且是社会科学更加成熟、进化和现代化的重要标志之一。我们已经看到,近年来在我国经济、人口、历史、法律、语言、文学等领域,由于引用系统科学的研究方法,已经取得了丰硕成果。

另一方面,由于社会科学的进化和发展,也为系统科学的丰富和发展提供了充实的新资料、新思想和新课题。例如正是由于许多复杂的社会系统的重大课题,促进了系统动力学、大系统理论以及经济控制论、人口控制论、社会控制论、经济信息论、管理系统论等等这些系统科学基础理论和专业理论的兴起与发展。

如果说系统科学与社会科学的关系日益密切,那么,它与自然科学的关系就更是不言而喻的了。

就本来的意义讲,系统科学就是在现代自然科学、技术科学和数学的基础上产生和发展起来的,这一点我们在本章第一节里已经谈到了,在以后的章节里还会涉及到。这里只想强调一点,那就是随着系统科学的发展和它对自然科学各个领域的渗透,将会进一步改变自然科学的面貌,将进一步促进自然科学的综合化、整体化、以及它与社会科学结合的趋势。生物控制论、信息物理学等新兴学科是自然科学与系统科学交缘的成果;生命热力学包含着深刻的系统科学的思想与方法。当布尔丁把“熵”概念引入到社会领域,建立他的所谓“组织化理论”时,他实

际上把自然科学与社会科学沟通起来了。日本的槌田敦进一步发挥了布尔丁的思想,提出了“熵守恒”原理,并用“潜熵”和熵的转化过程来解释生产过程,提出了“资源物理学”的理论。这个理论的产生,也是用系统科学的思想与方法,把自然科学的成果引入到社会科学中的结果。

在工程技术领域,系统科学与它们的关系就更显著了。在一定的意义上可以说,由于系统科学的产生,特别是系统工程的出现,改变和扩大了传统意义上的工程技术的内涵。传统意义的技术一般指根据生产实践经验和自然科学原理而发展起来的各种工艺操作方法与技能。例如电工技术、木工技术、焊接技术、育种技术等等。所谓工程主要指创造人类有用的物质条件,即造物的工作,例如机械工程、电气工程、水利工程、土木工程等等。所以,传统的工程技术主要是物质的操作技能与物质的创造活动。而系统工程中所谓的工程,多指“完成”、“组织”、“安排”,也就是为完成某项任务提供决策、计划、方案、方法和工作程序等等,以保证任务完成得最好,即最优化。这里也可以象有人主张的那样对工程学作狭义和广义的理解。所谓狭义工程学,就是“造物”的学问,亦即创造物质财富的学问;所谓广义工程学,就是在人类社会实践中为完成特定任务或达到某种目标,对客观事物(物质、能量、信息等)或实践方式(组织、协调、控制、指挥等)进行某种创新、改造或变换的学问^①。而系统工程或系统工程学,则是根据总体协调的需要,把自然科学、社会科学和系统科学的某些思想、理论、方法、策略和手段等,从横的方面有效

① 参见郑春瑞:《系统工程学概述》,科技文献出版社1984年版,第1—2页。

地组织起来应用于人的实践中，并应用现代数学和电子计算机等工具，对系统的构成要素、组织结构、信息交换和自动控制等功能进行分析研究，而达到最优设计、最优控制和最优管理的目标，是更加合理地研制和运用系统而采取的各种组织管理技术的总称。系统工程实际上是工程学和一切工程技术的方法论。它不同于以特定的工程物质为对象的其他工程学，系统工程不限于某个领域。任何一种事物系统都能成为它的研究和处理的对象，而且不限于物质系统。自然系统、社会经济系统、经营管理系统、军事指挥系统等，都可以成为它研究的对象。由于它处理的对象主要是信息，所以，通常也把系统工程看作是“软科学”。

从以上关于系统工程和传统意义上的工程学的关系可以看到，系统科学是工程技术的基础理论和方法论理论，它为工程技术提供组织、管理和决策的指导原则和思维方法。在一定意义上也可以说是工程技术的哲学。

三、系统科学与马克思主义哲学的关系

系统科学并不是世界观意义上的哲学，它不能也不可能代替马克思主义哲学，但它确与马克思主义哲学有着密切的关系。

首先，系统科学的某些思想原则和方法，早在马克思主义哲学形成的阶段，就已经得到了充分的体现和运用。马克思、恩格斯始终把系统观点作为辩证法的一种表现形态，在他们的著作中广泛地运用了系统概念，对复杂的社会经济形态、整个社会和自然进行了具体深入地研究。恩格斯就曾用系统的观点总结了十九世纪中期的自然科学成就。他指出：由于三大发现和自然科学的其他巨大进步，“我们现在不仅能够指出自然界中各个领

域内的过程之间的联系，而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了，这样，我们就能够依靠经验自然科学本身提供的事实，以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画”^①，制成一个在我们这个时代令人满意的“自然体系”，这时我们的研究就进展到可以向前迈出决定性的一步，“即可以过渡到系统地研究这些事物在自然界本身中所发生的变化的时候”了^②。在马克思的社会理论中，正如国外一些学者的研究成果所表明的那样，可以看出是由两个等级的系统构成的。第一是分析级的，即找出一切社会形式所共有的抽象特征，也就是关于社会经济形态的理论。而社会经济形态的分析模型这个大系统，由三个主要的小系统构成：经济基础、政治法律上层建筑、社会意识形态。第二是具体级的，即找出构成资产阶级社会这一特殊形式的内部结构的主要要素，也就是关于资本主义社会发展规律的理论。这集中体现在《资本论》中。马克思把生产方式看成是由各个独立要素构成的系统，把生产、分配、交换、消费看成是“一个总体的全部肢体”。马克思分析了这些要素在系统中的“独立运转”，并且在分析社会的变化时，认为这些变化是由原系统的内部过程的阶级矛盾产生的。因此，有的学者主张把《资本论》作为体现系统性原理的第一部科学著作，这不是没有道理的。

马克思的辩证法作为认识的方法、表达的方法，本质上可以归纳为从抽象上升到具体的方法；而在马克思的科学实践中，这种从抽象到具体的方法，也就是从对系统的模糊认识到对系统

① 《马克思恩格斯选集》，第4卷，人民出版社1972年版，第241—242页。

② 同上书，第241页。

的清晰认识的方法。在政治经济学的研究中,就是从劳动分工、需要、交换价值等已经抽象出来的简单规定为起点,上升到国家、国际交换和世界市场等具体范畴。一旦这些范畴的具体规定被确定之后,“各种经济学体系也就开始了”,这就是新系统的建立。“具体之所以具体,因为它是许多规定的综合,因而是多样性的统一。因此它在思维中表现为综合的过程,表现为结果,而不是表现为起点”。^①

其次,系统科学所体现的系统观是辩证唯物主义世界观的重要组成部分。这不仅因为系统性是物质的固有属性,还在于系统也是物质存在的一种基本形式,是事物之间的一种本质的联系和关系。因此,系统和物质、运动都是分不开的。事实上,任何系统都是物质运动的表现,而任何运动又都是系统存在的方式。从这一观点出发,就会使我们更加深刻地认识到运动并非是由物质以外的什么神秘的推动力产生的,而是根源于物质系统自身的结构和机制,根源于物质系统内部和外部环境的相互作用。至于物质世界为什么能够从相对低级的运动形式的基础上产生相对高级的运动形式,为什么物质世界的发展既是多样性的,又是统一性的,等等,在系统科学中也能给予更加科学的回答。由此可见,系统科学的产生和发展,系统观的确立,对于把辩证唯物主义世界观建立在更加牢固的基础之上,是不可缺少的,十分必要的。

第三,系统科学的研究成果,为马克思主义唯物辩证法的丰富和发展,起了补充和深化的作用。系统论的概念和原则,进一

^① 《马克思恩格斯选集》,第2卷,人民出版社1972年版,第103页。

步批判了机械决定论,为唯物辩证法提供了更加丰富、多样的联系的类型,深化了整体与部分、功能与结构等范畴的内涵。控制论的拟化形式,实现了唯物辩证法某些原则的具体化、模式化,提供了更具体、更准确地运用唯物辩证法去分析和解决问题的方法和途径。它揭示了信息传递和调节控制等事物普遍联系的新形式,丰富了人们对运动发展、量变质变、因果联系等哲学观念的内容,并为进一步揭示诸如简单和复杂、部分与整体、可能与现实、间断与连续、目的性和适应性等范畴的辩证关系提供了新的理论依据和认识途径。信息论对于深化唯物辩证法的联系与中介,对于理解认识中的辩证运动,提供了新的形式。七十年代以来兴起的系统自组织理论,则把唯物辩证法的发展概念、进化的概念更加具体化、深化和精确化了,它科学地阐明了发展与进化的内在机制的表现形式和规律性。

第二章 系统与系统概念

“系统”是在人类的长期实践中形成的概念。由于人们的实践目的、思维方式、认识角度和专业学科的不同，对于系统概念有着不同的理解，但从整体上、实质上把握它，应当有一个确定的、统一的界说和内涵。系统具有普遍性，它是物质存在的普遍形式。有没有非系统？这是近年来提出的一个理论问题，还有待于人们作进一步地研究和探讨。为了科学地认识系统，准确地把握系统概念，除给系统确定一个科学的定义之外，还必须对各种各样的系统进行分类和划分。

第一节 系统的概念

一、系统、要素、环境

“系统”这一概念是人们在长期社会实践中形成的。古希腊的哲学家就已经使用了这个概念，据说德谟克利特就写过一本“世界大系统”的书。从词源上讲，它的拉丁语 *Systema* 由接头词“共同地”和动词“使位于”结合而成，是表示群、集合等义的抽象名词。英文“*System*”一词在中文中有许多解释，诸如体系、系统、体制、制度、方式、秩序、机构、组织等。

在马克思恩格斯的著作中,系统的概念是经常用到的,例如恩格斯在《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》中,谈到自然科学研究方法和思维方法的转变时说:当着从旧的形而上学的研究方法“进展到可以向前迈出决定性的一步,即可以过渡到系统地研究这些事物在自然界本身中所发生的变化的时候,在哲学领域内也就响起了旧形而上学的丧钟”。恩格斯把这一认识上的飞跃称之为:“一个伟大的基本思想,即认为世界不是一成不变的事物的集合体,而是过程的集合体”。^①恩格斯所说的过程的集合体,就是系统的哲学概念。

但是,系统概念真正作为一个科学概念,而进入到科学领域,还是本世纪二十年代以后的事。四十年代,在美国工程设计中应用了这一概念。到了五十年代以后,才把系统概念的科学内涵逐步明确,并在工程技术系统的研究和管理中得到了广泛的应用。

那么,究竟什么是系统?如果我们撇开一切具体系统的具体的形态和性质,可以发现一切系统都具有以下几个共同点,即系统的同构性:

系统是由两个以上的要素(部分、环节)组成的整体,单个要素不能构成系统,世界上的一切具体事物、现象、概念,都可以构成系统。作为构成系统的要素可以是单个事物,也可以是一群事物组成的小系统。

系统的各要素之间、要素与整体之间、以及整体与环境之间存在着一定的有机联系,从而在系统的内部和外部形成一定的结构和秩序。可以把环境看成是系统所从属的更大的系统。

^① 《马克思恩格斯选集》,第4卷,人民出版社1972年版,第239—241页。

系统整体具有不同于各个组成要素(部分)的新功能。没有统一功能的要素集合体就不是一个系统。例如,机器零件的胡乱堆积就不构成机器系统,只有当它们按照一定装配关系组合起来时,才能构成机器系统。每一系统都有其特定功能。

系统和要素的区分是相对的。一个系统只有相对于构成它的要素而言才是系统,而相对于由它和其他事物构成的较大系统而言,则是一个要素(或称子系统);相应地,一要素只有相对于由它和其他要素构成的系统而言,才是要素,而相对于构成它的要素而言,则是一个系统。这样,就显示出系统具有层次性或等级性。

根据以上系统的共同特点,可以给系统下一个简明的定义:系统是由两个以上可以相互区别的要素构成的集合体;各个要素之间存在着一定的联系和相互作用,形成特定的整体结构和适应环境的特定功能;它从属于更大的系统。和这个定义相类似,贝塔朗菲把系统确定为“处于一定的相互关系中并与环境发生关系的各组成部分(要素)的总体(集)”。^①我国科学家钱学森则主张“把极其复杂的研究对象称为‘系统’,即相互作用和相互依赖的若干组成部分合成的具有特定功能的有机整体,而且这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。”^②

系统是由要素组成的,离开了要素就谈不上系统。要素是系统的最基本的成分,因此,也就是系统存在的基础。一般地说,系统的性质,是由要素决定的,有什么样的要素,就有什么样

① 贝塔朗菲:《普通系统论的历史和现状》,见《科学学译文集》,科学出版社1981年版,第315页。

② 钱学森等:《论系统工程》,湖南科学技术出版社1982年版,第10页。

的系统。所谓“物以类聚，人以群分”就是这个道理。要素在构成系统，决定系统时，各种要素要形成一定的结构。毫无结构的要素胡乱堆积，那不是系统，也形成不了系统，在这种情况下，要素也就不成其为要素了。

要素以一定的结构形成系统时，各种要素在系统中的地位和作用不尽相同。一般地说，在简单的、由相同要素组成的较低层次的系统中，各个要素的地位是平等的，作用是相同的。例如，由二十支同样的香烟所组成的一包完整的香烟系统，各个要素（每支烟）的地位和作用就没有什么区别。但是在复杂系统中，情况就不同了。在这种系统中，要素各不相同，它们所处的地位和作用也有很大差别。在这里，有些要素处于中心地位，支配和决定整个系统的行为，这就是中心要素，例如，动物的神经中枢器官，一个国家的首脑机关或首脑人物，等等。还有一些要素处于非中心、被支配地位，例如，一个商店的商品，一个杂技团的动物和道具等等。但是，系统的中心要素和非中心要素不是固定不变的。在一定条件下也可以转化。杂技团的动物在杂技场上表演的时候，它实际上就起着中心的作用。

系统的性质取决于要素的结构，而在一个动态结构的系统中，这种结构的好坏直接是由要素之间的协调作用体现出来的。优质的要素如果协调得不好，形成的结构可能不是最优的；但是，质量差一些的要素，如果协调得好，则可能形成优异的结构，从而决定出质量较优的系统。这在现实生活中是经常遇到的。因此，处理好要素与要素、要素与系统的关系，对于系统的功能和性质至关重要。

系统与环境同样也存在着密切的关系和联系。每一具体的

系统都是时空上有限的存在。作为一个有限的存在，都有它外界的存在或环境。一般把一系统之外的所有其他事物或存在，称为该系统的环境。环境是系统存在与演化的必要条件和土壤。环境对系统的性质和演化方向起着一定的支配作用。系统的整体性是在系统与环境的相互联系中体现出来的。这种联系本身就是系统赖以存在的条件。

系统和它的环境之间，通常都有物质、能量和信息的交换。环境的特点和性质的变化，往往会引起系统的性质和功能的变化；反之，由于系统的作用不同，也会引起环境的变化。两者相互作用的结果，有可能使系统改变或失去原有的功能。因而，系统就要有一种特殊的功能，来适应环境的变化，保持和恢复原有的功能。这就是系统的环境适应性。例如，自适应系统，自学习系统，以及前馈、反馈系统等。

在系统研究中，如何处理系统与环境的关系，是一个十分复杂的问题。一般地说，研究封闭系统比研究开放系统简便些，研究简单的环境比研究复杂的环境容易些。当所研究的是无组织的简单关系时，在一定条件下，可以忽略系统与环境之间的相互作用，视该系统为闭系统。如伽利略研究自由落体运动，牛顿研究万有引力，卡诺研究热机等等。在另一种情况下，可以只把那些与系统有联系的因素当作该系统的实际环境来研究。例如，在开系统中，实际环境并不是该系统周围的全部事物，而是专指那些与该系统有物质、能量、信息的交换关系的事物。因此，每一具体系统都有其具体的实际环境。另外，还可以把一系统和它的实际环境结合成新的闭系统。例如，可以把生物和它的环境结合成一个更大的闭系统，即生态系统进行研究。究竟如何

处理系统与环境的关系,还要根据许多具体情况和研究的目的、要求等等而定。

二、对几种系统定义的剖析

系统是一个涉及面十分广泛、内涵十分丰富的概念。不同的学科和领域所研究的系统的侧面也有所不同。正因为如此,人们根据研究的不同出发点、不同目的、不同角度、不同的思考方式,给系统确定了各种不同的界说,下了各种不同的定义。苏联学者瓦·尼·萨多夫斯基在《一般系统论原理》一书中,研究了近四十种系统定义,最终把这些定义分为三个类型。第一类是把系统看作数学模型的某一类,如:“系统是用来表述动态现象模型的数学抽象”。第二类是通过“元素”、“关系”、“联系”、“整体”、“整体性”这些概念给系统下定义。如A·霍尔和R·费舍的定义:系统是“诸客体连同它们之间的关系和它们属性之间的关系的集合。”第三类是借助“输入”、“输出”、“信息加工”、“管理”这类概念给系统下的定义,如:“系统是本质或实物、有生命或无生命物体的集合体,它接受某种输入并按照输入而产生某些输出,而其目的则在于使特定的输入和输出功能得到最佳的发挥”。萨多夫斯基着重分析了第二类定义,并从这些定义所包括的组成成分的类型及其关系中,说明这类定义在结构和功能上的特点以及它们的实际作用。^①

这里,我们着重分析一下较流行的两种定义,即把系统定义为关系和定义为集合。苏联学者M·麦萨洛维奇提出了系统的

^① 萨多夫斯基:《一般系统论原理》,人民出版社1984年版,第三章。

关系定义：系统 S 是在集合 $V_1, V_2, \dots, V_n$ 基础上确定的一种关系，即 $V_1, V_2, \dots, V_n$ 的笛卡儿乘积的(真)子集，亦即 $S \subset V_1 \times V_2 \times \dots \times V_n$ 。其中 $V_1, \dots, V_n$ 是所考察的诸客体的特性的有意义的集合。^①把系统定义为集合，即定义为元素、成分、部分、运行、操作、功能等的集合。如，“系统是客体、客体和客体之间的关系、客体的属性间的关系的集合”，“系统是相互关联而组合在一起的元素的集合”，或“执行特定功能而达到特定目的互相制约关联着的元素的集合称为系统”。

关系与集合是任何系统构成的不可缺的两个有机联系的方面。既不能把两者割裂开来，只取其一，而忽视另一方面，也不应当夸大关系与集合的差别。如果离开集合谈论关系，那么作为关系理解的系统就变成缺乏内容的抽象。在现代数学中，关系本身就被规定为一定的集合。但是，关系只应当是系统概念的一个方面，而不是全部。系统除包含着关系、联系外，还应当包含系统元素的功能、属性或性质。也就是说，应当把关系、联系、性质在内的初始集合本身包括到系统中去。苏联学者 $A \cdot H \cdot$ 乌约莫夫就是从关系和性质两个方面来定义系统的，“可以把系统定义为客体的集合，在此集合上实现着带有固有性质的确定关系”。还有一个与此对偶的定义：“把系统定义为客体的集合，这些客体具备预先确定的性质，这些性质则带有在它们之间固定的关系”。^②乌约莫夫认为，这两个定义是互补的，而不是相互排斥或相互割裂的。这种观点是可取的。

① 萨多夫斯基：《一般系统论原理》，人民出版社1984年版，第三章。

② $A \cdot H \cdot$ 乌约莫夫：《系统方式和一般系统论》，吉林人民出版社1983年版，第116页。

用集合来定义系统,或者说,对“系统”概念给予集合论的解释是用得较为普遍的(在这里,集合的概念包括着元素间的关系)。然而,无论那一种系统概念的定义,都不是绝对的。由于实践目的、学科范围以及研究的侧重不同等等,可以允许对系统的内涵作不同的揭示和理解。这就涉及到对“系统”概念进行元理论分析的问题。

对“系统”概念进行元理论分析,一般应当遵循两个原则。一是整体性和等级性原则。按照这个原则,作为整体的系统对于它的元素来说是第一性的,而任何系统原则上又都具有等级组织(层次)。二是多样性原则,即对任何系统都可以做多种描述。为了获得与系统相符合的知识,必须建立对它进行描述的各种类型,其中每一类描述都只能包括该系统的整体性和等级性的一定方面。^①一般说来,对任何所研究的系统至少可以对它进行三种不同水平的描述:(1)从它所具有的外在整体属性角度;(2)从其内在结构和把其成分“包括到”形成系统的整体属性的角度;(3)从把这一系统理解为更大系统的子系统的角度。实际上,在科学技术的实践中,由于研究系统的目的和出发点是多种多样的,描述系统的水平和层次也是很多的。这表明,对系统概念的认识,在一个共同的、总的规定之下,对于它的具体规定不必强求一致,可以视具体条件和实践的不同而有所不同。

任何定义都是简单的、有局限性的,它并不是人们认识的最终目的,而只是人们认识的一种手段。更重要的还是具体地分析和揭示各种系统本身所包含的丰富内涵与联系。

^① 参见萨多夫斯基:《一般系统论原理》,人民出版社1984年版,第115页。

第二节 系统的普遍性

一、系统的普遍性

系统作为一个重要范畴，反映了物质世界最普遍的本质联系、存在方式或属性。恩格斯曾经用系统的思想对普遍联系的观点作了精辟的分析。他指出：“我们面对着的整个自然界形成一个体系，即各种物体相互联系的总体。”^① 他根据当时自然科学材料，依照物质运动形式的固有区别和次序，把自然界概括为机械的、物理的、化学的、生物的四种基本运动形式，力图“以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画”。^② 这表明在恩格斯看来，系统是自然界普遍的存在形式，系统是普遍的。

现代科学表明，物质世界普遍具有系统形式或属性。整个自然界，从微观粒子到宏观天体，从无机界到有机界，从原生生物到人，一般地说，都是由部分组成，具有一定层次和结构并与环境发生关系的整体即系统。就物质世界而言，只要物质和能量存在着空间、时间上的不均匀，就存在着结构，就存在着序，因而也就存在着系统。例如，在微观世界，粒子的坐标和动量是不能同时准确测量的，但两个不确定量的乘积 $\Delta X \cdot \Delta P_x = n\hbar$ 却是确定的，这就是量子力学中著名的海森堡测不准关系。 ΔX 与 ΔP_x 是这个系统的要素，虽然每一个要素 ΔX 、 ΔP_x 都是不确定

① 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社 1971 年，第 54 页。

② 《马克思恩格斯选集》，第 4 卷，人民出版社 1972 年版，第 242 页。

的，但这个系统的整体却体现了确定的联系。处于自然环境中的系统，其中各个部分都具有系统形式。社会是由生产力和生产关系、经济基础和上层建筑等部分按一定层次和结构组成的，因此也是个系统。思维现象也是这样。

物质世界不仅普遍以系统形式存在着，而且普遍以系统形式发展着。事物发展的系统特征主要表现为要素、层次、结构、环境等各种因素对事物整体发展的综合作用过程。也就是说，事物的发展变化总是通过整体的发展变化表现出来，而整体的发展变化则是要素、层次、结构、环境诸因素共同起作用的结果。任何事物发生、发展和灭亡的过程都是这样：在事物发展的上升阶段，内部要素不断增长，层次性和结构的稳定性不断加强，与环境关系日益紧密；而在事物发展的下降阶段，作为其存在基础的各个组成部分就会停止增长并衰亡下去，层次和结构就要瓦解和破坏，原来与环境的关系就要减弱和中断，于是它作为一个整体也就无法存在下去了，旧事物就会被新事物所取代，而新事物又会重新开始它的系统运动过程。

总之，物质世界是普遍以系统形式存在并发展着的。科学的历史就是不断揭示物质世界系统性的历史。科学本身就是关于客体系统性的知识。古代所以没有“真正的自然科学”，就因为那时人们对客观世界各个领域的系统性还缺乏认识，或者虽有某些认识，也是片面的，不系统的。十八世纪，特别是十九世纪以后，各门科学所以普遍发展成熟起来，并使“自然科学的系统化”^①成为必要，也正是由于人类在实践基础上日益全面地、

① 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社 1971 年版，第 233 页。

深刻地认识了客观世界各个领域以及这些领域之间的系统性的结果。现在各门科学都在揭示物质世界系统性方面飞速前进，并在这个过程中不断完善自己，发展自己。不承认系统的普遍性，否认物质世界的系统性，也就是不承认科学，否定科学。这是没有根据的。

二、系统与非系统

系统是物质的普遍存在形式和发展形式，这是不是说系统就是一切？存在不存在不属于系统的所谓“非系统”的东西？有没有非系统的联系？这个问题引起了国内外一些人的兴趣。有的学者在研究系统性原理的时候，提出了“非系统”或“非系统性”概念。把一些相同的甚至不同的独立的部分（要素）的简单汇集的集合体称之为“综合统一体”、“堆积物”或“聚积物”。由于构成这一“统一体”的各个部分之间并不存在有机联系，因此认为是“非系统”的。还有的作者认为“非系统”是系统的“否定因素”、“冲击力”、和“振荡力”，如无意识（潜意识、潜意识）、灵感、直觉、幻想、激情等等，就属于非系统。这里就有一个如何理解系统性，“系统”与“非系统”的对立在什么范围内才有意义的问题。

首先应当明确的是，包括系统科学在内的现代科学技术的发展，已经从总体上描述了一幅世界的系统图景，并且揭示了物质存在形式和普遍属性的物质系统性。它与运动观和时空观一样，都是世界物质统一性原理不可分割的部分。如前所述，系统作为物质存在的形式，即现实世界的一切事物、过程，都是由相互联系的要素所构成的有机整体。系统是无所不在的。尽管对

于系统性原理在马克思主义哲学中占有什么地位，我们的哲学家还有这样那样的看法，但关于系统的客观性与普遍性则已经为自然科学和哲学所普遍承认。

物质系统这种绝对性又实现于现实世界的系统的相对性之中。对于具体的系统说来，由于构成系统的要素之间都是有条件的，联系的方式也是多种多样的，从而形成了千姿百态的物质系统。我们可以按其性质划分为自然系统、社会系统，而按其结构则有严密结构和非严密结构的。对于非严密结构的系统整体来说，例如森林、湖泊、沙堆，虽缺少其中的任何一棵树、一滴水、一粒沙仍不失为森林、湖泊和沙堆，但是并不是说每一棵树与森林、树与树之间就没有联系了。每棵树都具有构成森林的特性，而一棵草就没有这种森林性。即使被认为“一盘散沙”的沙也不是绝对的非系统。它们虽没有生物学那种系统性，但沙与沙之间存在着力学的关系，具有力学性质的系统性。如果孤立地看森林、湖泊、沙堆，它们之间并无什么联系；但从自然生态环境这一角度考察，则又存在内在联系。这说明具体系统要素之间联系是有条件性的，因而是相对的。但相对与绝对的关系并不是系统与非系统的问题。

组成系统的各个部分之间存在着有机联系。当然相互之间有的联系紧密些，有机程度高些；有的相对于某一个确定的对象它不构成系统，但它与另一些要素相联系则构成了系统；还有各部分之间在相对于某一特定的关系来说不存在有机联系，但从另一种关系来看它们之间又构成一个有机的整体。人们把那些联系不紧密，把不属于某一对象范围，相对于某一特定关系不存在有机联系的整体与部分统统称之为非系统，或者把那种传统

的机械决定论的思维方法称作非系统观念。应当注意到从本体论来讲，宇宙任何客体都是系统。万物皆系统。而“非系统”的概念则是相对的，只是一种“近似”。问题在于科学认识选择一个什么角度或参照系，把对象放在哪一个认识坐标系的格子里。因而“系统”与“非系统”的区别只有在认识论的范围内才是有意义的。离开了认识论这一领域谈“系统”与“非系统”的对立无疑是荒谬的。

第三节 系统的分类

世界上存在着各种各样的具体系统。无论在不同等级的系统之间，还是在同一等级内不同类型系统之间，都存在着质的区别。面对千差万别的各种具体系统，我们需要根据其共同点和差异点进行分类，否则就会堕如烟海，无从下手。于是系统分类学应运而生。它的任务在于为系统分类提供理论依据，为系统分类建立科学标准，并对现实世界中的各种具体系统进行分类，从而为深入研究各种具体系统及其相互关系，为深入研究系统进化奠定基础。

这里只是粗略地勾画系统分类学框架。

一、系统等级的划分

系统是结构与功能的统一，结构是诸要素排列的序，而功能是诸要素活动的序。结构与要素具有相对独立性，从而结构具有等级性；功能与要素活动具有相对独立性，从而功能也具有等级性；结果，结构等级与功能等级辩证地统一成为系统等级。系统

的等级性乃是一般系统的基本性质之一。它表明系统的每一组元又可以被视为一个系统，而所研究的系统本身又是由它和其他系统构成的更大系统的组元。

通常，我们称系统是由两个或两个以上的要素组成的，这些要素又可分成下一等级的要素。这时，为避免语言上的混乱，我们就引进“子系统”概念，说该系统是由两个或两个以上的子系统组成的。原则上，一个系统可分成无穷多个等级。最后，我们就达到在所考虑的问题范围内不能或不必要再加细分的一些基本单元，并称之为要素。另一方面，我们所考虑的系统又可以与其他系统相结合而构成更大的系统。这时，也是为了避免语言上的混乱，我们引进“超系统”概念，说这一系统是我们所研究的系统的超系统。

这样，我们就得到了两个方向相反的系统等级序列，其一是向下的等级序列，其二是向上的等级序列：

(1) 系统→第1级子系统→第2级子系统→……→第 n 级子系统→要素；

(2) 系统→第1级超系统→第2级超系统→……→第 n 级超系统→总系统。

这里“总系统”是指在我们所考虑的问题范围内不能或不必要再与其他系统结合而构成更大系统的总体系统。

在最简单的情形下，子系统、系统与超系统如图2.1所示。

在实际的研究工作中，系统等级的划分可根据研究者的需要而进行。但是研究者在划分系统等级时，必须以所研究系统的自然等级作为依据。例如，当我们把宇宙作为一个系统考虑时，可得出如下的系统等级：……基本粒子——原子核——原

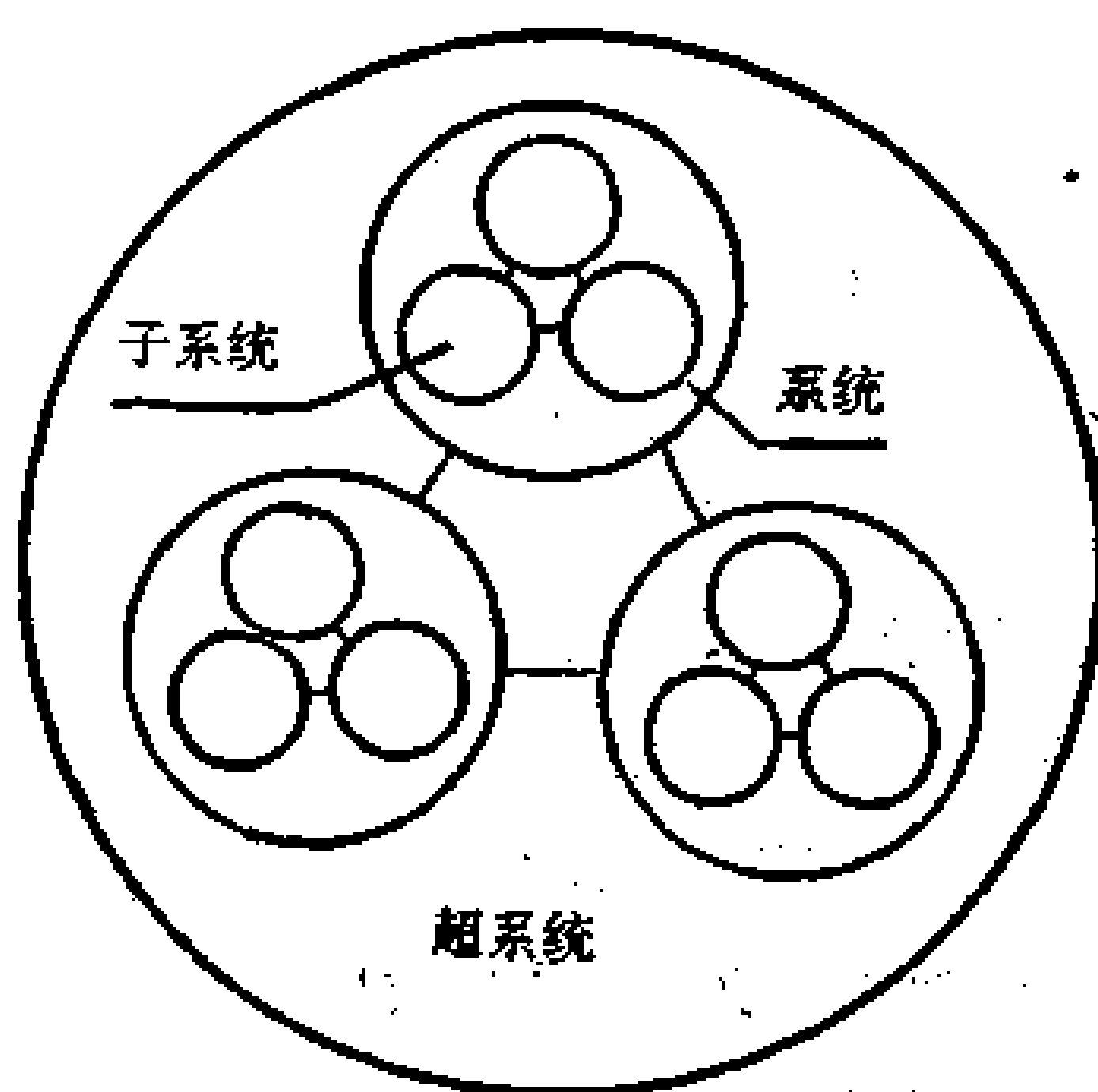


图 2.1 子系统—系统—超系统

子·分子——物体——星球——星团——星系——星系团——超星系团……。当我们把全人类视为一个系统而个人是人类的基本单元时，人类系统等级可表示为：个人——家庭——社会行政单位——国家——全人类。在人类系统中，在群体（如家庭）以上等级不可避免地存在着管理问题。根据有关人员的管理权限大小，管理系统可分成多个等级，如企业系统的管理等级为：工人——班组长——车间主任——厂长——经理。在生态系统中，捕食者-被捕食者关系是错综复杂的，但从食物中潜在的能量流的角度上看，食物链构成了金字塔式的营养等级：绿色植物——草食类动物——肉食类动物——杂食类动物。从以上例子可知，在划分系统等级时，必须根据所研究系统的自然属性，提出与此相应的划分标准。在大量的实际系统中，系统等级形成金字塔式结构。如同在上述的宇宙等级、人类等级、管理等级和食物链等级中所看到的那样，在这些等级系统中，越是低级

的,个体数就越多;越是高级的,个体数越少。

就不同等级之间的关系而言,不同的系统等级并非相互无关地并存,而是排成由简单到复杂,由低级到高级的等级序列。高级系统由低级系统组成,但又具有一些低级系统所没有的特性。并且,不同等级系统之间有相互联系和相互转化的关系。在研究一系统时,要弄清它的系统等级,这一点对于研究的成败具有决定性意义。这是因为具体系统的规律都反映着某一系统等级的规律;低级系统的规律理所当然地渗透到高级系统中去,同时又受着高级系统规律的制约,但高级系统又有其特殊规律,这些规律不能完全地还原为低级系统规律。也就是说,对于任何系统,必须在系统的等级序列中进行研究。

二、子系统与分系统的划分

系统可用下列的两种不同方式定义:

第一种:系统可定义为相互作用的诸要素的集合。

第二种:系统可定义为抽象集上的关系,即

$$S \subset \times \{V_i | i \in I\}$$

其中 S 为系统, $\times$ 表示笛卡尔积, V_i 表示诸关系, I 为指标集。

不难理解,从第一种定义形式,可推知系统的等级性。系统的每一等级包含有各自独立的多个子系统,而系统可视为这些子系统的相互联系中产生的整体。

与此不同,从第二种定义形式,可以得到“分系统”概念。所谓分系统,是指系统的各子系统(或要素)在某些侧面具有重要意义的某些关系。这样,系统被看作是相互联系的各分系统的集合。分系统概念在系统研究中具有十分重要的意义。因为对

任一系统的研究不仅包括对其子系统(或要素)的研究,还包括对它们之间相互关系的研究,而对这些关系的研究可分成对各分系统及其相互关系的研究。

系统的子系统和分系统可图示如下:

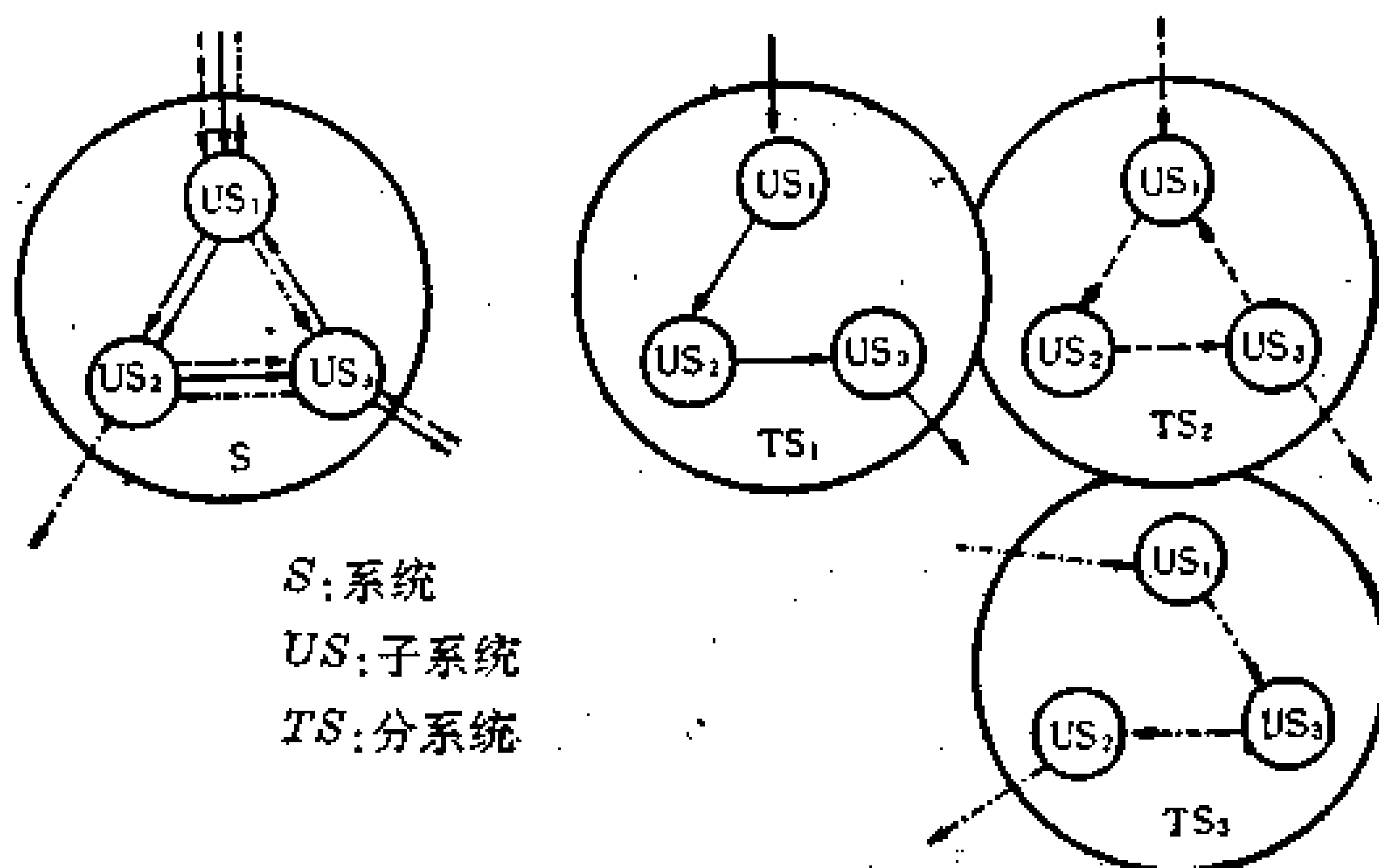


图 2.2 子系统与分系统

根据上述的概念,我们来考察一些系统的子系统与分系统。在把中国作为一个系统考察时,它的第一级子系统为三十个省、直辖市与自治区,第二级子系统为各专区及专区级城市,第三级子系统为各县及县级城市;而它的分系统有国防系统、外交系统、邮电系统、商业系统、教育系统、财政系统,等等。在把人体作为一个系统考察时,它的子系统可示为:“机械”结构:头、躯干、手臂、腿;“功能”结构:大脑、眼睛、胃、心脏等。它的分系统可示为:信息传输方面:神经系统;能量供给方面:血液循环系统;支撑作用方面:骨骼。从以上两个例子可知,研究任何系统,我们既要研究其各级子系统,也要研究其各分系统。这里需要

指出的是,一个分系统也可以分成诸多等级,亦即成分系统的多级子系统。因此,对系统的子系统研究和分系统研究互相补充,相得益彰。用通俗的话来说,子系统与分系统的关系相当于“块块”与“条条”的关系。

研究一个系统,可以有两种路径。其一,是先分析系统等级,找出各级子系统,然后再来分析系统的各分系统及其等级;其二是先分析系统的各分系统及其等级,然后再来研究各级分系统的组元,弄清系统自身的子系统等级及各子系统。无论采用哪一路径,最后都可以得出统一的子系统-分系统矩阵。该矩阵可图示如下:

子系统 \ 分系统	分系统 1	分系统 2		分系统 m
第一级子系统	a_{11}	a_{12}		a_{1m}
第二级子系统	a_{21}	a_{22}		a_{2m}
.....	...	...	...	...
第 n 级子系统	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nm}
要 素	$a_{[n+1]1}$	$a_{[n+1]2}$	...	$a_{[n+1]m}$

图 2.3 子系统-分系统矩阵

这里, a 表示与子系统相对应的分系统组元,亦即与分系统相对应的子系统组元。无论对任何系统,我们都可以制成子系统-分系统矩阵。

三、若干系统类型的划分

以上所述的关于系统等级的划分和子系统或分系统的划分

的原理,适用于一切系统。此外,在系统研究中还要根据其他分类标准进行系统分类。这里,我们讨论两种分类方法,其一是根据现实系统的实际内容进行分类,其二是根据系统数学模型的特性进行分类。

按现实系统的实际内容进行分类:

1、一般系统与具体系统。在系统科学中,“一般系统”概念作为一个专业术语,是指从各种现实系统中抽去特殊内容而得到的抽象物,实则指所谓“系统”本身。相反,含有实际内容的各种现实系统,不管它是天然的还是人造的,物质的还是概念的,生命的还是非生命的,都叫作具体系统。显然,一般系统体现各种现实系统的共性,而具体系统则是一般系统的各种表现形式,它除了具有一般系统属性外,还具有各种特殊属性。系统科学的研究对象既包括一般系统,还包括具体系统;研究一般系统,决不能脱离具体系统的研究,不仅如此,必须从具体系统中发现一般系统的一般规律。

2、天然系统与人造系统。具体系统,根据它是不是人造的,可分为天然系统 and 人造系统。人造系统,是指靠人的劳动和其他活动制成的各种系统。例如,石器、房屋、机器、人造卫星、电子计算机等都是人造系统,人类文化系统、科学技术体系等也是人造系统。天然系统,是指与人类的劳动和其他活动无关地产生和存在着的各种系统,例如,地球、太阳系、银河系等都是天然系统。

3、自然、社会与思维系统。在科学的传统上,人们把对象世界分为自然系统、社会系统和思维系统。思维系统,是指由人的神经、心理、语言、文字、逻辑、思维方法以及其他思维工具组

成的系统。思维系统的结构与功能以及发展规律乃是思维科学的研究对象。社会系统即人类社会，是指由相互发生社会联系的众多个人组成的总体。社会系统可分为政治、经济、军事、教育、行政等分系统，这些分系统则是社会科学各分支学科的研究对象。除思维系统和社会系统之外的一切系统，就被统称为自然系统。它分为生物系统和物理系统，前者为生物科学的研究对象，后者则是物理科学（包括物理学、化学、天文学、地学）的研究对象。

4、物质系统与概念系统。具体系统，根据其要素是物质还是概念，又可分为物质系统与概念系统。物质系统，是指以各种物质（和能量）作为要素而构成的系统，例如原子、分子、矿山、气象、海洋、机器、人，等等。概念系统，是指以各种概念作为要素而构成的系统，例如科学体系、法律体系、宗教体系、哲学体系，等等。

5、生命系统与非生命系统。一切活着的物质系统，称为生命系统，其中包括生物系统和人类社会系统。它们是所谓一般生命系统理论的研究对象。除生命系统以外的一切物质系统，则称为非生命系统，如原子、分子、机器、天体等。物理科学的研究对象一般是非生命系统，但目前越来越多的物理科学家正在探讨生命系统的物理机制。

按系统的数学模型进行分类：

1、封闭系统和开放系统。一个系统如果与环境有输入或输出或输入-输出关系，就称为开放系统，否则就称为封闭系统。即是说，凡具有边缘要素的系统，就称为开放系统；凡不具有边缘要素的系统，就称为封闭系统。这里所说的边缘要素，是

指具有下列性质的要素：它的输出不转化或不完全转化为其他要素的输入，或者它的输入不是或不都是来自其他要素。这里，需要注意的是，物理学和系统科学在用语上的区别。物理学上通常把系统分为三种：开放系统，指与外界交换物质和能量的系统；封闭（或闭合）系统，指与外界只交换能量而不交换物质的系统；孤立系统，指与外界既无能量交换又无物质交换的系统。

2、静态系统和动态系统。静态系统，亦称无记忆系统。如果一个系统在任一时刻的输出只与该时刻的输入有关，而与该时刻之前或之后的输入无关，则称之为静态系统。相反，如果一个系统在任一时刻的输出不仅与该时刻的输入有关，而且与该时刻之前的输入有关，则称之为动态系统。动态系统显然是有记忆系统。而动态系统又可分为时不变系统（亦称定常系统）和时变系统。系统无论在何时由同样的输入得出相同的输出，就称为时不变系统，否则就称为时变系统。

3、线性系统和非线性系统。当把系统的输入或初始状态线性迭加时，系统的输出也能线性迭加，就称该系统为线性系统。不服从迭加原理的，就称为非线性系统。严格地讲，世界上并没有真正的线性系统。实际系统一般都含有各种非线性因素，如感受器的阈值、效应器的疲劳、测量元件的不灵敏区、放大器的饱和等。即使一个线性的电阻器，当施加的电压超过一定阈值时，其物理性质发生变化，从而不满足线性要求。但是因为非线性微分方程至今没有通用的准确解法，所以在较大范围内最好用非线性模型表示的系统，当它的变量保持在一定数值范围内时，往往近似表示为线性系统，而这种线性模型通常具有很高的准确度。

4、连续系统和离散系统。当系统的状态集 X 、输入集 U 及输出集 Y 是离散集合时,就称之为离散系统;当 X 、 U 及 Y 是 R^n (R 为实数集)中的开集时,就称之为连续系统。在系统研究中,十分重要的问题是从系统动态过程与时间的关系上考察系统的连续性和离散性。如果用来描述系统的时间函数 $f(t)$ 的定义域是连续的,即 $t = (-\infty, +\infty)$ 或 $(t_0, +\infty)$,则称该系统是连续时间系统;如果 $f(t)$ 的定义域是离散的,即 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$,则称该系统是离散时间系统。

在连续时间系统中,系统的输入、输出和状态变化是时间的连续函数,可用微分方程描述。但在离散时间系统中,系统的输入、输出和状态变化是各离散时刻的值,需要用差分方程表示。

连续时间系统理论已在许多领域,尤其在物理系统领域取得了很大发展。而离散时间系统理论正在广泛应用于社会、经济及许多工程系统领域,如自动机、脉冲控制、采样调节、数字控制等。

5、确定性系统和不确定性系统。考虑系统表达式:

$$S = \{X, U, Y, \delta, \beta\}.$$

其中 X : 状态空间; U : 输入空间; Y : 输出空间; δ : 动态(即状态转移函数); β : 输出函数。据此表示的系统可分为确定性系统和非确定性系统。确定性系统是指系统的实时输入和实时状态能明确唯一地规定下一个状态和实时输出。不确定性系统是指系统的实时输入和实时状态不能明确唯一地规定下一个状态和实时输出,即是说,被规定的是一些可能状态的集合或一些可能输出的集合。在不确定性系统中,如果根据实时输入和实时状态能确定下一状态或实时输出的概率分布,则称之为概率系统;否则就

称之为非概率不确定性系统，这时被规定的不是下一状态或实时输出的概率分布，而只是其可能状态或可能输出的集合。在非概率不确定性系统中，如把 X 、 Y 、 U 的子集换为各自的模糊子集，就得到模糊系统。在模糊系统中，系统的状态不是状态空间中的点，而是它的子集，对于系统的下一个状态，不知其概率分布，只知其关于给定子集的隶属度。

6、黑色系统、白色系统和灰色系统。系统根据其“颜色”可分为黑色系统、白色系统和灰色系统。这里，“颜色”是指研究者对系统状态(或系统内部结构与过程)的认识程度。当灰色系统理论产生之前，这三种系统被称为黑箱、白箱和灰箱。所谓黑色系统，是指我们只知道该系统的输入-输出关系，但不知道实现输入-输出关系的结构与过程。所谓白色系统，是指我们不仅知道该系统的输入-输出关系，而且知道实现输入-输出关系的结构与过程。所谓灰色系统，是指我们对于系统实现其输入-输出关系的结构与过程只有部分的知识，尚无全面的知识。关于黑色系统和白色系统，已有成熟的描述方法，近年来产生和发展起来的灰色系统理论以灰色参数、灰色方程、灰色矩阵等来描述灰色系统。这里，所谓灰色参数，是指我们只知其部分性质，而不知其另一部分性质的参数，以 $\otimes$ 表示。所谓灰色方程，是指含有灰色系数(灰元)的方程，如

$$\otimes X + 1 = 0$$

所谓灰色矩阵，是指含有灰元的矩阵，如

$$A(\otimes) = \begin{bmatrix} \otimes_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

由于人们所研究和处理的大量系统(如社会、经济、文化等系统)

可视为灰色系统,因此,灰色系统理论有着广阔的发展前景。

7、简单系统和复杂系统。现在,我们还不知道这两种系统的严格界限在哪里。但是我们知道,任何现实物质系统原则上都有无穷多的方面,其中的每个方面通常可以用简单的系统模型表示,但这些系统本身又不能不说是复杂的。这样,我们还不能从数学上严格地定义简单系统和复杂系统。B·C·佛列依斯曼根据现实系统的行为复杂程度,把各种系统分为自动系统、决策系统、自组织系统、预见系统和转换系统,从而把自动系统看作是简单系统,其余系统看作是复杂系统。自动系统对外界作用的反应是确定的,它的内部组织能使偏离平衡状态的系统过渡到平衡状态。太阳系、原子和钟表等被视为简单系统。而 R·罗森认为,所谓简单系统,是指根据用来规定状态变化的力学规律,能以单一的状态空间给出完整描述的系统;否则就是复杂系统。因此,力学系统是简单系统,生物、社会等系统是复杂系统,微观的物质系统因服从测不准关系,因而也是复杂系统。还有一种观点,则与上述两种意见不同,它不是从系统行为的复杂程度或系统描述的复杂程度出发区分简单系统和复杂系统,而是直接从系统结构的复杂程度出发区分简单系统和复杂系统。系统结构的复杂性被视为取决于两个因素,其一是系统内的要素数目,其二是要素与要素之间的关系数目。系统的复杂度就表示为系统内要素之间的实际关系数目和可能的最少关系数目之比,即

$$C = \frac{m}{n-1}$$

其中 C :复杂度; m :实际关系数; $n-1$:可能的最少关系数,等于

要素数 n 减去 1。由此认为,当 $C=1$ 时,称该系统为简单系统;当 $C>1$ 时,称该系统为复杂系统。据此,系统内即使有大量要素,如它们之间的关系数很少,也可以是简单系统;相反,即使系统含有的要素不多,但是它们之间的关系数多,也就可以是复杂系统。例如,图 2.4 所示的系统是简单系统,因为

$$C = \frac{m}{n-1} = \frac{4}{5-1} = 1$$

但图 2.5 所示的系统是复杂系统,因为

$$C = \frac{m}{n-1} = \frac{3}{3-1} = 1.5 > 1$$



图 2.4 简单系统的例子

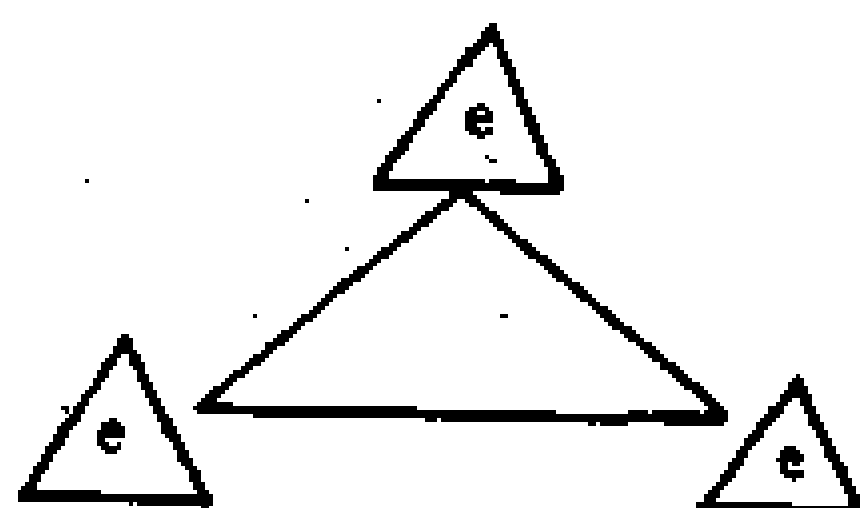


图 2.5 复杂系统的例子

但是,仅以 m 与 n 定义系统结构的复杂度,也有不妥之处,因为系统结构的复杂性不仅与系统内要素数与关系数有关,而且与要素的多样性、关系的多样性(如关系的强弱,关系的质,例如串联或并联、前馈或反馈等)有关。

可见,关于简单系统与复杂系统的划分问题,尚须进一步探讨。或许,这两个概念完全是相对的概念。

8、大系统。系统按其规模大小可分为大系统、中系统或小系统。但是,至今还没有关于大系统(以及中系统、小系统)的严格定义。首先,需要指出的是这里所说的“规模”并非指直观上的规模,例如不是在太阳系或埃及金字塔的规模很大这种意义

上使用的。规模的大小并不单纯指系统自身的性质，而是与人的认识有关的。例如，对于研究电子元件的技术人员，电子计算机是个大系统。但对于大型计算机网络设计人员，一台计算机只是网络中的一个部件。又如，罗马俱乐部的世界模型中，整个世界并非被视为大系统，而是只由五个变量组成的小系统（见图 2.6）。因此，系统的规模取决于系统具有多少个不需再分割的要素。在罗马俱乐部的世界模型中，这样的要素只有五个，即人口、污染、粮食、天然资源以及资本。这样，所谓大系统，是指由大量要素构成的系统。但是“大量”与“少量”之间的区别完全是相对的。即是说，这一区别往往与人们的思考方式、手段与方法有着密切关系。现在人们所说的大系统，实则是指大规模复杂系统，即是说它不仅规模庞大，而且结构与功能都很复杂。

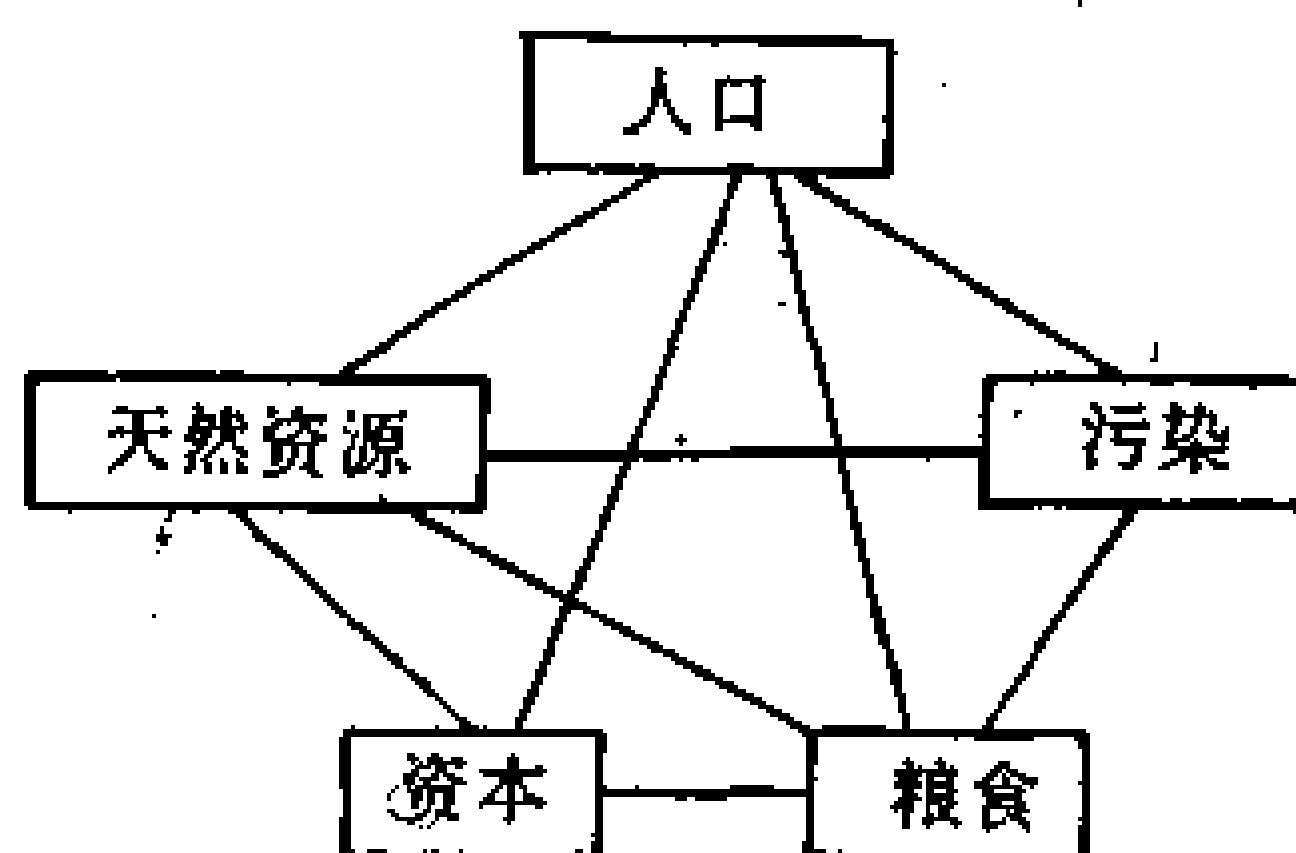


图 2.6 “增长的极限”中的世界模型

我们在以上的讨论中，按现实系统的实际内容和按系统的数学模型，对各种各样的系统作了分类。当然，我们还可以根据其他的标准进行系统分类。这些分类，显然是对各种具体系统或系统模型的在某个特定意义下的抽象。现实系统或系统模型通常并非仅以上面列举的各种系统类型中的某一类型而存在，

而是在它们的相互交叉、相互并合和相互渗透中作为复合系统存在。所谓复合系统，是指一个系统具有上述分类中两种或两种以上的系统类型特征。这样，我们就可以得到各种各样的复合系统，如自然系统可分为天然的自然系统和人造自然系统，概念系统可分为关于社会的概念系统、关于自然的概念系统和关于思维的概念系统，我们还可以有连续时间线性定常系统或离散时间非线性时变系统等复合系统。复合系统的概念要求我们对每一个具体系统要从系统的各方面实际内容和各方面特性去考察。

第三章 系统的整体性

系统的整体性作为系统各构成部分的统一，它在系统科学中占有十分重要的地位。自从一般系统论创立以来，系统的整体性作为系统科学的原理被提了出来，贝塔朗菲就曾指出：“普通系统论是对‘整体’和‘完整性’的科学探索”。^①

第一节 系统整体的观念

一、人类对整体性认识的历史

人类对整体性的认识，经历了漫长的历史。古代素朴的整体观念，是同世界本源问题联系在一起。成书于殷周之际的《易经》中提出的“阴阳‘八卦’”和《洪范》中的“五行”之说，都是把自然界看成是某些要素相辅相成组成的有机整体。春秋战国时代，墨子的“一”与“多”，施惠的“至大无外，至小无内”，南宋陈亮的理一分殊思想，称一为天地万物的理的整体，分殊则是这个整体中各事物的功能。这些论述都在一定程度上揭示了客观事物的整体

^① 贝塔朗菲：《普通系统论的历史和现状》，见《科学学译文集》，科学出版社1981年版，第314页。

性及辩证的层次关系。

中国古代素朴的整体观念强调的是整体、和谐和协调。西周末年的史伯就有“和实生物，同则不继”之说，“和”即和谐，指各部分之间的有机联系，“和”则万物生。把酸、甜、咸……等不同味道，有机地调和起来，就能做出美味的佳肴；把各种音响协调起来，就能成为绕梁三日的美妙的音乐。而“同”即相同事物之间的简单相加，机械等同，仍然还是原来的事物，故谓“同则不继”。以后春秋时期齐国的晏婴对“和”与“同”又作了进一步的阐发。中国古代这一整体观念，对中医的整体辨证论治传统的形成曾起了积极的作用，并对后来哲学思想以极大影响。耗散结构理论的创始人普利高津对此曾作了高度的评价：“中国传统的学术思想着重于研究整体性和自发性，研究协调和协同。现代科学的发展……更符合中国的哲学思想”，他预言“西方科学和中国文化对整体性、协同性理解的很好结合，将导致新的自然哲学和自然观”。①

在古代希腊，许多哲学家也探讨过事物的整体性。赫拉克利特在《论自然界》一书中，把世界看作“包括一切的整体”。爱利亚学派的巴门尼德认为“存在”就是整体，“存在不生不灭，它是整体，唯一和不动”。德谟克利特则认为原子是世界的本原，事物就是由没有性质差别，只有形状、大小和排列方式不同的原子组合的整体，它在无限的虚空中互相碰撞，互相结合，从而形成了世界上的万物。亚里士多德从整体与部分的关系，形式和质料的统一，对整体性作了较为深刻的阐述，可以说是古代素

① 《自然杂志》，1979年，第9期。

朴的整体观念最丰富、最有价值的遗产之一。

古代的整体观念是建立在对自然界直观的基础上，本身带有直观性和思辨性。恩格斯在总结古代辩证思维的特点时指出：“在希腊人那里——正因为他们还没有进步到对自然界的解剖、分析——自然界还被当作一个整体而从总的方面来观察，自然现象的总联系还没有在细节方面得到证明，这种联系对希腊人来说直接的直观的结果。这里就存在着希腊哲学的缺陷，由于这些缺陷，它在以后就必须屈服于另一种观点。”^①

从十五世纪下半叶开始，随着近代自然科学的产生，自然科学进入了收集和积累材料的阶段，概括那一时期科学革命特征的方法，除了用按数学形式表达的因果法则来描述事件的方法外，就是把自然界分解为各个部分，对它进行分门别类的研究。这种分析方法，成为近代认识自然方面所以获得巨大进展的基本条件。但是，将上述方法绝对化，久而久之形成这一时代特有的概念“规范”和科学模式，把复杂的现象分解成基本的部分和过程，然后又按孤立的组成部分去解释复杂的现象。牛顿曾以这种观点描绘了一副机械的世界整体图景：宇宙是由那些单个分散的、相互吸引并相互起机械作用的物体组成，这些物体的运动具有严格的决定论的机械的性质。与牛顿同时代的德国的哲学家、数学家莱布尼茨则提出了“单子论”，认为世界是事物的复合，而复合物不是别的东西，只是一些单纯物的一个堆积或聚集，这些单纯物就是单子。单子是不可分的实体，一个独立自在的统一体，它既不能按自然的方式由各部分组合而产生，也不能因为

^① 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1984年版，第48页。

分解为各部分而消灭。单子既然没有部分，也就“没有可供事物出入的窗子”，它们互不通气的，也不能接受外部的影响。单子性质上各不相同，多种多样的单子构成了千差万别的事物，因而莱布尼茨理解的整体就是各种各样的单子的堆积或聚集。但莱布尼茨所说的单子与笛卡儿和斯宾诺莎被动的、惰性的“僵死的实体”不同，认为单子是一种“自身具有活动力、具有永不静止的活动原则的实体”，是一个“自为的世界”。^① 莱布尼茨在斯宾诺莎的实体概念上增添了自己活动的原则。十八世纪法国的唯物主义者霍尔巴赫在他的《自然的体系》一书中，讲到自然整体时指出：“自然，从它最广泛的意义来讲，就是由不同的物质、不同的配合、以及我们宇宙中所看到的不同的运动的集合而产生的一个大整体”。^② 霍尔巴赫把整体看作不同物质、不同配合、不同运动的集合，这无疑比莱布尼茨的单纯物的机械堆积前进了一步，并且作为当时哲学最高荣誉的是没有被同时代自然知识的狭隘状况引入迷途，没有象牛顿、莱布尼茨那样借助于神的力量，他坚持从世界本身说明世界。但是霍尔巴赫也没有能够摆脱这一时代思维的局限性，他所指的物质配合、运动仍然未超出机械论的范围。因为他在说明物质、运动的特性时，仍然把不可分性、不可入性作为物质普遍的特性，把力作为运动的原因。

到了十九世纪，德国的哲学家黑格尔，从整体与部分的关系上论述了整体性的思想。他认为，世界上任何事物，无论在天上

① 参见《十六——十八世纪西欧各国哲学》，商务印书馆1963年版。

② 霍尔巴赫：《自然的体系》下册，商务印书馆1964年版，第159页。

或是在地下，无论在自然界还是精神世界都是许多方面内在联系着的整体。例如一朵花，它有香味、形状、颜色等许多方面性质，但一朵花并不是各方面的机械凑合的堆集，作为一朵花的整体，这些组成部分彼此间是内在地、必然地联系着的。所以黑格尔关于整体性的理解与机械论的观点不同，强调它的内在的、必然的联系。但是，由于黑格尔哲学是以唯心主义为前提的，认为世界是由精神——绝对观念创造的，所以他的整体观也是头脚倒置的。

二、系统的整体性

科学的系统的整体观念首先是马克思和恩格斯在他们所创立的辩证唯物主义的哲学中被确立起来。马克思、恩格斯继承了人类对整体性认识的成果，对黑格尔的辩证法进行了根本改造，使它不是用头立地；而重新用脚立地，摆脱阻碍它将辩证法贯彻到底的唯心主义的装饰，从而使唯心辩证法变成唯物辩证法，唯心的整体观也改造为唯物的整体观。恩格斯在《路德维希·费尔巴哈与德国古典哲学的终结》一书中，分析了随着自然科学的发展，使人们由研究既成事物过渡到系统地研究这些事物在自然界本身中所发生的变化之后，指出世界表现为一个有机联系的统一的整体，因而自然科学的本质就是“关于过程，关于这些事物的发生和发展以及关于把这些自然过程结合为一个伟大整体的联系的科学。”深刻地分析了主客观辩证法的统一。

随着系统科学的产生，整体性成为一般系统论的一个重要的研究内容。贝塔朗非曾以联立微分方程组表述了系统，并在

此基础上将微分方程组,

$$\begin{cases} dQ_1/dt = f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ dQ_2/dt = f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \\ \dots\dots\dots \\ dQ_n/dt = f_n(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \end{cases}$$

展开为泰勒级数:

$$\frac{dQ_1}{dt} = a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + \dots + a_{1n}Q_n + a_{111}Q_1^2 + \dots$$

来说明系统的整体性。其中 Q_i 表示元素 P_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的某些量, 因而 Q_i 量的任何变化, 是所有元素 Q_1 至 Q_n 量的函数, 某一元素 Q_i 的变化, 导致所有其它元素以及整个系统的变化, 任一元素的变化都依赖于所有其它元素, 系统因而表现为一个整体。并且指出: “一个元素在系统内部的行为不同于它在孤立状态中的行为。你不能从各个孤立部分概括出整体的行为; 为了理解各个部分的行为, 你必须把各种从属系统和它们的上级系统之间的关系考虑进去。”^① 美国华盛顿大学教授卡斯特、罗森茨韦克等人在他们的《系统理论与管理》、《组织与管理——一种系统学说》等著作中认为系统管理的学说就是提供一种把企业内外环境、各种因素作为整体进行考虑的思想方法和结构。根据托马斯·霍普金斯所概括的几条原理, 整体是基本的, 而部分是派生的; 一体化是事物的各个部分相互联系的状况; 各个部分组成一个不能分解的整体, 以致没有一个部分能够在不影响其它各部分情况下而受到影响; 各部分是按照整体的目的发挥它们的作用的; 部分的性质和它的职能是由它在整体中的地位而

① 贝塔朗菲:《一般系统论的基础、发展和应用》,第三章。

确定的，它的行为是受整体和部分的关系规定的；整体是一种能的系统，或能的综合体，或能的结构，不管多么复杂，它如同单个部件一样地运转；一切事物都应该从整体出发，这是前提，各个部分和它们的相互关系，应该自然地逐渐进展，卡斯特等人从管理系统中组织内部各项活动，组织与环境“一体化”，提出系统整体性的思想。

客观世界从自然界到人类社会，任何事物都是由各种要素以一定方式构成的统一整体。虽然构成系统整体的要素可以是物质客体，也可以是一些观念的要素，或者是过程的阶段。在结合方式上，可以按外部方式联系着的物质客体的机械组合，也可以象生物、社会更加复杂的方式联系着的系统整体。而作为整体性则主要表现为整体联系的统一性，即整体与部分、部分与部分、系统与环境联系的统一性。现代科学的成果已经揭示了系统整体联系的统一性。以生命科学为例，人体系统包括有许多细胞、组织和器官，它们的形态各异，功能也不相同，但它们彼此并不是孤立地存在着，而是按照一定的关系，适应整体活动的需要，相互协调一致地活动着。当人们进行劳动时，人体各部分骨骼肌精确地彼此协同地收缩与舒张；呼吸和心跳相应地加快，肌肉血管扩张，以适应骨骼肌细胞代谢活动的增强；皮肤血管相应扩张，汗腺分泌增强，以散发更多热量，调节体温不致过高；而消化系统的活动则相对地减弱，以节约能量的消耗。人体任何功能活动也都是在许多不同组织器官的共同协调中完成的，心脏的跳动就与血压、血液酸碱度和温度、血液中激素的量以及钠、钾的离子浓度和比例有关。人体整体联系的统一性，还表现在病理过程中，一种功能变化，引起与之联系的其它功能相应的改

变。慢性支气管炎,可以引起肺泡膨胀破裂,肺泡膨胀破裂形成肺气肿,可以使肺循环阻力增大,而肺循环阻力增大又加重了心脏负担,导致原发性心脏病,又引起患者不断咳嗽,久咳成喘,以致出现心悸、浮肿等症状。^①总之,不管是人体系统还是其它什么系统,系统的整体性就是整体联系的统一性。

三、整体的有机性

系统整体存在着多种的形式,但都有着一个共同的特征,即是它的有机性。贝塔朗非认为应当树立“把世界‘看作一个巨大组织’的机体主义观点”^②。他的“机体”或“有机”的概念是从生命科学中引出来的,但我们今天使用这个概念已超出了生命科学或者有机化学的意义。系统之所以能保持着它的整体性,是由于组成系统的要素之间保持着有机的联系,从而形成一定的结构。

整体的有机性具有以下几个特点:

首先,存在于整体中的部分,不论该部分是否能作为相对独立的部分(如钟表中的齿轮可以作为独立的部分而存在,人体中的手臂却不能离开整体独立存在),都只有在整体中才能体现出它具有部分的意义;一旦离开了整体,这个部分就失去了整体的部分的意义。所以,整体的有机性,正是反映在整体与部分的关系中。对于整体的部分来说,是指整体中的各个要素,都存在着构成系统整体的那种特性和内在根据。这不仅对于有严密结构

① 参见元文玮:《医学辩证法》,人民出版社1982年版。

② 贝塔朗非:《普通系统论的历史和现状》,见《科学学译文集》,科学出版社1981年版,第321页。

的统一体,如动物的肢体是这样,而且对于结构不严密的“综合统一体”来说仍然是这样。一棵树虽然不是森林,但无可否认,它又具有可能构成森林整体的那种特性,而一棵草就不存在构成森林整体的那种特性。但这棵树,只有当它成为森林整体中的部分时,它的这种可能构成森林的特性才得以体现。

其次,构成系统的要素所具有的那种整体特性,只有在运动中,按一定的规律进行着整体与部分、部分与部分、整体与环境、以及不同层次之间的信息、能量、物质的交换,并且在交换中保持整体的一定度,系统整体才能体现为一定的系统质和功能。对于系统的要素来说,只有在运动中,才能使要素存在的那种构成整体的特性得以体现。就如同一架钟表,各个部件虽然按一定的关系相互组合成一整体,但是如果不给钟表传递能量,不上紧发条,那么钟表仍是“死的”,它的整体质的特性和功能就不可能显现出来。另外,如果整体在运动中,信息、能量、物质的交换遭到部分或全部破坏,系统也就会部分地或完全地失去了它原来的整体性。如动物一旦受到伤害,依其整体受到破坏的不同程度,或失去了它的部分肢体与器官,导致功能残缺不全,或者丧失整个的生命,使整体性瓦解。

整体的有机性,不仅表现为整体内部要素之间的联系,而且也表现为与外部环境的联系,过程持续性的联系,即反映系统整体存在和发展过程中环境、整体、要素之间的关系。任何系统整体,它又是更大系统的部分,具有构成更大系统整体的特性。对于时间的整体来说则是指事物发展过程中的某一个完整的阶段。由于有机结合的方式和特点不同,从而出现了不同质的形式。但是不管处于那一种形式的整体系统,也不管属于严密结

构的整体还是非严密结构的整体，是实体系统还是非实体系统（过程系统，思维系统），一切系统整体性都表现为整体、要素、环境的有机联系和辩证统一。这种联系是系统整体所以能够有规律运动，系统整体所以能出现部分所不具有的系统质，并表现一定的系统特性和系统功能的原因。如果组成要素之间缺乏这种有机联系，便不能形成一定结构，不能保持整体、要素、环境三者的统一，不能形成一定规律性的运动，不能表现为一定的功能和特性，因而也不可能出现部分所没有的整体的新质，从而也不可能形成一个系统。这犹如一个装配好了，并上紧发条运动着的时钟与一堆未经装配的零件之间存在着质的差别一样。所以，康德在谈到“合目的性”整体的有机性的特点时，要求它的各部分都只有与其整体相关连才有可能存在，各部分之间又互为因果，互为目的和手段，而且整体具有自组织的功能，能够自己再生产。^①

系统整体的有机性程度，也就是整体的组织化程度。整体的有机程度越高，则整体的组织化程度就越高；否则系统是紊乱的，无序的。据此，我们就可以用有序度 R 来描述系统整体的有机性程度。系统完全无组织时（无序），可以认为熵达到了极大值 $H = H_{\max}$ ；当系统完全有序，整体组织化程度达到最高时，则 $H = 0$ 。如果实际系统的熵为 H' ，那么该系统整体的有序度 $R = 1 - \frac{H'}{H_{\max}}$ ，其中 $0 \leq R \leq 1$ 。当系统的熵逐渐增大， H' 增大至接近于 $H_{\max}$ 时，系统有序度就趋近于 0，系统整体有机程

① 康德：《判断力批判》，第 64—65 页。

度也达到了极小值。当系统的熵 H' 逐渐减小, 系统的有序度就逐渐提高。随着系统有机性程度的增加, 系统整体发育, 也由低级走向高级的发展。

第二节 整体的加和性与非加和性

一、整体与部分

任何整体都是以它的部分之间有机联系作为基础的。整体与部分的关系不是一种外在的机械关系。黑格尔曾辩证地论述了全体与部分之间的关系, 他说: “全体的概念必定包含部分, 但如果按照全体的概念所包含的部分来理解全体, 将全体分裂为许多部分, 则全体就停止其为全体”, 而“机械关系的肤浅性一般即在于各部分既彼此独立, 而部分又离开全体而独立”。^① 现代系统理论认为部分之间、部分与整体之间存在着统一性, 并把它们之间的对立统一看作是简单的物理-化学系统, 以至复杂的生命有机体和社会系统中的一般组织原理。

由于整体与部分相互联系的方式和性质的不同, 整体与部分之间的关系有着多种的形式。

一种是在整体中保持着部分的相对的独立性, 即整体中的各部分既可以作为独立物而存在, 又在整体中保持其相对的独立性而相互结合。例如机器中的齿轮, 电子设备中的电子元器件, 它们既是机器或某一电子设备这个整体的部分, 也是在不改变

^① 黑格尔:《小逻辑》, 商务印书馆1981年版, 第282—283页。

其形态、并仍然保持齿轮的动力的传递、变速和某些电子元件的放大、检波功能情况下,成为其他整体——金属切削机床、加工动力机械或计算机、电视机的功能部件。但是,对于一个特定的人工自然的整体来说,机械零部件和电子元器件的组合,都是按照一定的使用目的、一定的规律和原理结合成为整体的。至于一般自然整体,如由基本粒子、原子、分子等组成的物质,由星体组成的星系,则是由各种自然力——引力、电磁力、强相互作用力与弱相互作用力把各个组成部分联结起来而形成整体的。因此,我们说,成为组成这些整体的部分,它的独立也是相对的。

另一种结合方式是部分在整体中必须改变自己形态才能与其它部分相结合,在整体中不能保持相对独立性,但整体的部分又存在着改变形态而离开整体成为独立物的可能性。在化学性的整体中,分子既是参与化学反应的主体,又是在通常情况下保持物质化学性能的基本单位,而分子是由原子构成,但并不是原子的机械的堆积,原子间相互作用形成分子,主要是通过化学键来实现。水分子就是由氢与氧以离子形态相互结合而成的,由于不同原子间发生价电子的转移产生正、负离子,由于其间的库仑吸引作用,在水分子中,氢、氧就不能保持其独立性,但一旦分解它可以在一定条件下转化为独立的氢分子和氧分子。这对于原子间因共用价电子而产生吸引作用,即由共价键构成分子时,如金刚石、氨(NH_3)、甲烷(CH_4)也是如此。

还有一种形式,部分在整体中只是名义上的部分,它不存在转化为独立物的可能性。例如,人体的某一器官就不能象氢离子和氧离子那样有转化为独立物的可能性,“割下来的手就失去了它的独立的存在,就不象原来长在身体上时那样,它的灵活

性、运动、形状、颜色等等都改变了,而且它就腐烂起来了,丧失它的整个存在了。只有作为有机体的一部分,手才获得它的地位。”^① 人体的整体联系,主要是通过神经——体液调节系统来实现的。神经系统能够在人体整体联系中起主导作用,是由于神经细胞的化学组成和代谢过程以及形态的特殊性,使它具有接受刺激和传导兴奋的功能。内外环境的各种刺激作用于感受器后,感受器把刺激转化为兴奋,传入中枢,通过中枢神经的综合分析,调节人体各组织器官的活动。而体液调节,主要指人体内分泌的各种激素,经血液和淋巴液运送全身,对功能活动具有一定调节作用。人体是在神经-体液系统调节下,通过“自动控制”的形式相互联系着的有机整体。在类似于人体的活的机体中没有孤立的部分存在,正是在这个意义上恩格斯说:“只是在尸体中才有部分”。^②

从上述整体与部分关系的各种形式中可以看到,系统是由相互联系的诸部分组成的具有特定性能的整体。部分是构成整体的基础,没有部分就没有整体,整体离开了部分只能是一种抽象的同一。但是,部分又是整体制约下相对独立的部分,离开了整体就丧失了作为该整体的部分的品格。所以整体与部分既有区别又相互联系,相互规定。整体与部分的统一还体现在局部的变化总是以整体联系为前提,整体的变化,又总是在局部变化的联系中实现的。例如在社会系统中,国民经济各部门有着密切的关系,到本世纪末我国钢铁工业的发展的奋斗目标就要

① 黑格尔:《美学》,第一卷,商务印书馆1982年版,第156页。

② 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社1984年版,第85页。

以那时的国民经济对钢铁工业的需求量为根据。一方面钢铁工业是基础工业,到本世纪末,重工业、轻工业、农业都要有较大发展,特别是能源、交通、原材料工业的发展,都要消耗大量的钢材;但另一方面钢铁工业,投资大,耗能多(目前约占全国总能耗的10%左右),占用运输量多(约占铁路运输量的18%),因此它的发展又要受到能源、交通、采掘、机械等产业部门可能提供的条件和国民经济各部门综合平衡要求的制约。而国民经济总体发展目标又是通过各部门综合平衡、协调发展而实现的。再如,在生命活动中,局部的病理变化作为疾病过程的组成部分,既受着整体变化的制约,同时又影响着整体的变化。肺结核病的病变虽然主要是在肺部,但病人还有全身疲乏、食欲不振、血沉加快等反应,如果体内抵抗力降低,肺部的病菌还可以繁殖播散到全身,引起肾、肠、脑部的结核病变。另一方面,肺部的变化也受全身免疫力、营养状况等影响,当机体免疫力增强时,肺部的病变可以被局限化、钙化,甚至痊愈。反之,在营养状态低落时,原有陈旧病灶又可能复发。由此可见,部分与整体是对立统一的关系。

在历史上曾经有过割裂整体与部分联系的两 种 错 误 的 观点。一种是整体论观点。它片面强调整体对部分的支配作用,“整体”对于“部分”来说是第一性的,认为整体先于它的组成部分而出现,整体要超越于它的组成部分,这样一来整体的质似乎就是凭空产生了。在生物学领域就有这样一种观点。这种观点片面地认为生物体的整体功能不能分解为它的组成部分,生命的整体特征是由超越于它们的神秘的实体——生命力或隐得莱希所决定。还有一种是机械的还原论的观点。它否认整体的

特殊质和它的规律性，认为整体的各种属性都只不过是部分属性加和的结果，因而只要研究了孤立的部分就可以完全理解整体。但是“无论骨、血、软骨、肌肉、纤维质等等的机械组合，或是各种元素的化学组合，都不能造成一个动物”。^①还原论的观点虽然看到了整体是由部分构成的，部分对整体的决定作用，却忽视整体对部分的支配作用，部分对整体的依赖性，整体质与部分质的区别，从而把部分对整体的作用绝对化。关于整体对它的部分的支配、统摄作用，黑格尔在他的《美学》一书中有一段深刻的论述：“个别物体虽是各自独立的客观存在，而同时却都统摄于同一系统。例如太阳系就是这样方式的客观存在。太阳、彗星、月球、行星一方面表现为互相差异的独立自在的天体；另一方面它们只有根据它们在诸天体的整个系统中所占的地位，才使它们之所以成为它们。它们的特殊方式的运动以及它们的物理的性质都取决于它们对这个系统的关系。这种密切联系就形成了它们的内在的统一，就是这种统一使个别存在的天体互相关联而结合在一起。”^②

整体与部分的统一性，告诉了我们在认识 and 解决整体与部分两个相应任务方面的互相制约性：对给定系统整体性描述的任务，只有在解决了把系统以“整体性方式”划分为部分的任务之后才能解决；而以“整体性的方式”把该系统划分为部分的任务，只有在解决了把该系统描述为某种整体性的任务之后才能解决。^③认识系统整体与部分相互制约性，正是系统思维固有的

① 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1984年版，第86页。

② 黑格尔：《美学》第一卷，商务印书馆1982年版，第150页。

③ 参见萨多夫斯基：《一般系统论原理》，人民出版社1984年版。

悖论性。

二、加和性与非加和性

在了解了整体与部分的关系以后，还需要进一步研究整体与部分关系的性质：加和性与非加和性。

整体是由部分构成。整体是部分的集合。对于某些性质和量度来说，整体等于部分之总和，因而整体与部分之间存在着加和性。贝塔朗菲曾这样定义加和性：“一个复合体能够通过把原先分离的元素集合拢来的办法一步一步地建立起来；反之，复合体的特征能够完全分解为各个分离元素的特征。”^①

关于加和性很早就已经被人们所认识到了，原始人类采用“结绳记数”，就是用绳子结的集合来反映猎获物等现实物体的加和性。古代希腊数学家欧几里德大约在公元前 320 年所著的《几何原本》中曾把一个完全数定义为“等于它的各部分之和的数”，在数学上整体等于各部分的总和作为一条原理成为数学四则运算的基础。加和性关系反映整体与部分之间量的守恒方面有着客观的普遍性。在社会系统中，整体与部分的这种加和性是屡见不鲜的。如果一个公司下属有几个工厂，而每个工厂都各自独立生产某种产品，工厂与工厂之间，产品与产品之间耦合关系较弱，这时公司的整体目标——总产值，就可以分解为各工厂的目标（局部目标），公司的总产值就等于各工厂生产的产品的产值之和。如果用 Z 表示总产值， X_i 表示 i 种产品的产量， C_i 表示 i 种产品的价格， $i=1, 2, \dots, n$ ，则就有

^① 贝塔朗菲：《一般系统论的基础、发展和运用》，第三章。

$$\max Z = \sum_{i=1}^n C_i X_i$$

由此可见，整体与部分关系的加和性，首先是从整体的构成要素、过程的阶段以及反映整体的某些性质和量度而言的。对于那些满足以下条件的系统：各部分之间的相互作用比较弱，对于某种研究目的可以忽略不计的，记述各部分行为的关系是线性的，那么，一般说来整体与部分具有加和性。

整体与部分之间除了存在加和关系外，还存在着非加和关系。这主要反映了整体质的变化和量的非连续性、量的不守恒方面。由于整体内部各部分之间存在着相互作用，每一个部分的性质与行为依赖于其它部分，并影响着其它部分的性质和行为，所以整体中部分的性质与行为不同于在孤立状态下部分的性质与行为。同时，系统中各构成部分都是按着一定方式相互联系，形成了具有一定结构的整体，出现了它的组成部分所不具有的新的质、新的功能和新的规律，因此，整体的功能也就不是各部分功能的简单相加，表现出了系统的非加和性。非加和性也是客观世界普遍存在的现象，无论在活的机体、社会集团以及无机自然界中都可以遇到这一事实。

系统的加和性与非加和性既有区别又是相互联结和相互转化的。 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ 的化学反应过程，箭头两边，即反应前的物质与反应后形成的物质不同，存在着非加和关系，而又有着质量的守恒关系，原子数的加和关系。氘——氘热核反应过程虽然反应前后的质子数和中子数都相等，但这并不意味着热核反应仅仅是核子的简单的重新组合，而是发生质变，形成了氦核和中子，出现质量的“亏损”，即反应前的氘核和氘核的静止质量

与反应后氮核和中子的静止质量之总和,两者相差0.01887,出现了非加和的情况。但是,根据质能联系公式 $E = mc^2$,这部分“亏损”的静止质量,在反应中发生了物质形态的转化,并伴随着巨大能量的释放,其中主要是以 γ 射线的形态辐射出去了,物质的静止质量转化为物质的运动质量—— γ 射线的质量。从这个意义上说,反应前后能量又是守恒的。在系统演化过程中还存在和发生着非加和性与加和性相互转化的情况,如果系统内部联系愈紧密,非加和关系就越占统治地位,反之,当系统趋于瓦解时非加和关系就会日益转化为加和关系。贝塔朗菲也意识到了这一点,认为如果描述系统的基本模式方程中表示元素的某些量的 Q_i 的系数不是常数,而是随时间的变化而减少: $\lim_{t \rightarrow \infty} a_{ij} = 0$, 即元素间相互作用随时间而减少,系统的原始统一状态逐渐地分裂为各自独立的因果链,产生了“分异”,系统从未曾分化的整体状态转化到各组成部分的分化状态。各组成部分被固定在某种机能上,则元素的功能,依赖于元素自身定型的程度,生物的整体组织就是由原始整体的分化(分离为部分)而逐渐建立起来。例如胚胎发育的定型,胚原基从均势状态变为各部位的总和,这些部位各自独立发育成器官。由于系统分裂为一条条因果链,元素功能依赖于元素自身定型程度逐渐增大,由于相互联系而存在于整体中的调节能力则越来越小,从而发生了由非加和性行为向加和性行为的转化。原始统一机能转化为部分的机能是一种进步,然而这个进步同时又是未定型状态还可能有的机能的枯竭和丧失,一切进化都靠某一潜在的可能性展开,而同时又把其它许多可能性扼杀于萌芽状态中。

因而,加和性行为和非加和性行为“它们之间不存在对抗,

而只存在由整体性行为到加和性行为的逐渐转化”。^①

第三节 整体性原理

一、整体的组合效应

贝塔朗非在创立一般系统论时，看到构成系统整体的各个部分具有孤立的部分所没有的有机联系，因而重新提出了被人们遗忘了两千多年的亚里士多德的哲学命题：“整体大于它的各部分的总和”。作为系统性原理的一种表述，也有人称此为贝塔朗非定律。但是“整体大于部分之和”并不能完整地表达系统整体性原理的基本内容。

从对整体与部分的加和性与非加和性的分析，可以看到整体与部分关系无论在量上还是质上都有着多种复杂的情况。从构成量的关系来看，在集合论中无穷集合，整体不一定大于部分之总和，甚至可以小于部分，而在有穷集合中则整体大于部分或等于部分之总和。在微观客体中，存在的各种物理现象，如将氮原子对半分开，变成两个氦原子，每个氦原子的体积都比原来氮原子大，用高能粒子将质子打碎，每个碎片都可以“恢复”到原来质子的大小，几个“夸克”组合为强子，它的质量竟比单个“夸克”的质量还小得多，锂核受质子轰击产生裂变，从静止质量看，整体大于部分的总和，从动质量角度看又是守恒的，整体等于部分的总和。因而不能以某一个物理量作为衡量部分与整体的唯一

^① 贝塔朗非：《一般系统论的基础、发展和应用》，第三章。

标量,从而得出整体“大于”、“等于”、“小于”部分之和的简单结论,而是应该具体分析整体中各部分结合的不同方式和条件,选择相应的物理量(如静质量还是动质量,体积还是能量)作为标量,具体确定整体与部分的关系。而从质和功能方面来看,系统整体的性质具有构成它的部分所没有的性质,因而反映整体质的整体功能也不等于组成它的各部分功能的总和。马克思、恩格斯曾以协作、分工和工场手工业、机器和大工业的领域中,不同的系统整体存在着不同效应的事实指出:“许多人协作,许多力量溶合为一个总的力量”,“就造成了一种‘新的力量’,这种力量和它的一个个力量的总和有本质的差别”,^①它不仅提高了个人生产力,而且创造了一种生产力,这种生产力本身必然是“集体力”。整体系统出现新质,产生“新的力量”,是否在功能上都会大于部分的总和呢?系统整体与部分的非加和性是否表现为“整体大于它的各部分的总和”唯一的形式呢?其实不然。象拿破仑所描写过的骑术不精的一定数量的法国骑兵,由于形成一个密集队形和严格的纪律,它所显示出来的整体性的新的力量,就能战胜骑术较精、剑法高超、善于单个格斗,但缺乏严格纪律、人数较多的马木留克骑兵。前者整体显示出来的力量大于单个作战的力量之和,而对于后者则相反。在中国流传着两个脍炙人口的成语故事:“三个臭皮匠,顶个诸葛亮”和“三个和尚没水喝”。同样是由三个人组成的整体,但三个皮匠一条心,群策群力,达到常人所不及的智慧;而三个和尚三条心,谁也不愿多出半分力,结果是一个和尚挑水喝,两个和尚抬水喝,三个和尚没

^① 《马克思恩格斯全集》第3卷,人民出版社1972年版,第166页。

水喝！出现了绝然相反的两重整体的效应。

用“整体大于它的各部分的总和”来表述整体性原理的不确切性，还在于整体虽然是由部分所构成，具有孤立部分所不具有的特性，但是整体同时又丧失了组成部分在孤立状态所具有的某些部分的特性。例如在化学中无论是价电子转移、共有，还是自由电子的存在，都是化学键电性本质的表现。这种电子运动的状况在原子内部和在分子内部是有质的区别的。在共价键形成过程中，虽然对于核外电子运动的状况，不同化学键理论有着不同的考察方法（共价键理论认为形成共价键的电子运动是局限在两个相邻原子的小区域内，核外电子运动的质变是局部性的；而分子轨道理论则认为形成共价键的电子运动已属分子的整体，而不再属于哪个原子，核外电子运动的质变是整体性的），但不管是那种理论都认为原子在化合成分子时失去了大部分本来的属性，而保留的只是极少一部分的属性，^①所以整体性的形成，就是系统中各要素部分特性的丧失。

其实，亚里士多德在许多著作中曾以“整体不是其部分的总和”更加确切地表述了关于整体与部分的思想。在《亚里士多德全集》牛津英译本第一卷里，亚里士多德这样写道：“一般说来，所有的方式显示整体并不是其部分的总和”（“In general, all the ways of showing that whole is not the sum of it's parts……”）他举例一所房屋并不等于它的砖瓦、木料等部分的总和，然后说：“由此看来很清楚，你可以有了各部分，而还没有整体，所以各部分（在一起）和整体并不是同一回事。”亚里士多德意思是这

^① 参见《化学辩证法问题初探》，人民教育出版社1980年版。

些部分只是事物的质料，它们的总和还不等于这个事物（如房屋），必须把形式加上去它们才成为事物（房屋）。他在《形而上学》第七卷、《物理学》等著作中多处阐述了“整体不是其部分总和”的思想。贝塔朗菲也意识到用“整体大于部分之和”来表述系统整体性原理多少给人们带来一种神秘感，所以在他晚年所著的《一般系统论的基础、发展和应用》一书中对此作了一个补充说明，认为“整体大于部分之和”这句话“其实它的含意不过是组合性特征不能用孤立部分的特征来解释。因此，复合体的特征与其元素相比似乎是‘附加的’或‘突现的’。然而，如果我们知道了一个系统所包含的所有组成部分以及它们之间的各种关系，那么就可能从组成部分的行为推导出这个系统的行为。”

通过对系统整体效应的分析，可以看到系统整体性作为系统科学的一条基本原理，就是指的由各个要素按一定的方式构成的有机整体，其要素作为整体的部分，要素与整体、环境以及各要素之间相互联系、相互作用，使系统整体呈现出各个组成要素所没有的新的质，因而具有构成部分所不具有的功能。如果用类似于亚里士多德的哲学命题来表述这一原理，我们也可以简要地表述为“整体不等于它的部分的总和”。但必需指出，这里所讲的“不同于”或“不等于”，主要是指整体与部分之间存在着质的差别，由此产生的整体效应不等于组成它的各部分功能的总和而言的。

基于对系统整体规律性的认识，整体与部分在功能上呈现出的非加和性，那么就有可能根据系统的目标，通过提高系统要素的基质和系统整体的组织化程度，使得整体的功能大于它的

部分之总和。因此，当我们用“整体不等于它的部分的总和”简要地表述整体性原理的时候，丝毫不意味着对“整体大于它的部分之总和”这一命题的抛弃，而是把它作为人类改造自然、改造社会的实践中应该遵循的行动准则，从而也成为现代系统工程中系统设计与实施的整体化原则。

二、整体效应的机理

系统整体组合性特征所产生的整体效应，或“附加量”，是可以正的，也可以负的。那么如何解释这种组合性特征呢？答案是恩格斯在《自然辩证法》中引用的黑格尔的那句话：“相互作用是事物的真正的终极原因”。^①

耗散结构理论就认为系统论的一个基本特点，就是要考虑系统的整体性，要研究系统内各个单元的相互作用和相互联系，并具体分析各种相互作用的性质。处在热力学的平衡态和近平衡态的比较简单系统，各个粒子之间可以近似地看作是线性的关系，虽然分子间存在着相互作用，但都属于短程力，作用半径只 10^{-9} 厘米数量级，粒子间距离稍远一点作用力就衰减为零而没有影响了，所以整个系统仍可以认为是各个独立作用的粒子线性相加。如果系统是远离平衡态，则各个粒子间相互作用是非线性的，系统内各粒子之间可能出现一种相干性（或协同性），它表现出超出厘米范围的宏观时间尺度的长程关联，出现大量粒子的协同动作，普利高津称这种新的特性为“长程通信”，使得整体不是各个部分的线性叠加。耗散结构中相互作用

① 《马克思恩格斯选集》第3卷，人民出版社1972年版，第552页。

的非线性与相干性,不仅对热力学,而且对一般开放系统都有着同样的意义。例如人的双眼的视敏度比单眼高六至十倍,肥料交互作用的组合效应,氮、磷、钾按不同比例混合就会产生不同的肥效。^①

信息科学又从交互信息、结构信息组合性特征所产生的整体效应的机理作了进一步的分析。如果用 x 和 y 分别表示两个事物, $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为 x 的 n 种可能状态的集合,各种状态发生概率为 $P_1, P_2, \dots, P_n$; $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 为 y 的 m 种可能状态集合,各状态发生概率为 $q_1, q_2, \dots, q_m$; 它们的不定性分别用熵 $H(x) = -\sum_{i=1}^n P_i \log P_i$ 和 $H(y) = -\sum_{j=1}^m q_j \log q_j$ 表示。如果 x 与 y 的状态互不影响,彼此独立,它们之间的交互信息为零,这时 x 和 y 联合事物的整体的不定性则为最大联合熵 $H_{\max}(x, y) = H(x) + H(y)$ 。如果 x 与 y 之间有着某种联系, x 的状态的确定将影响 y 的某种状态,而 y 状态的确定又影响 x 的状态。这样就可以通过 x 知道 y 的某种信息,通过 y 知道 x 的某种信息。这时由 x 和 y 两个元素相互联系,传递了某种信息 $I(x, y)$,使得组成的整体的不定性 $H(x, y)$ 小于 $H_{\max}(x, y)$,这个交互信息量就等于排除不定性的大小, $I(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y)$ 。交互信息越多,整体的效应就会越不同于它的组成部分之和。同时不同部分的数量及其相互联系的方式,又决定着系统的组织程度,系统可以具有的结构数目 $n = K^V$ (V 为不同单元素, K 为单元间可能有的关系数),而结构不定性的排除程度,即为该系

① 参见沈小峰:《试论耗散结构理论中的哲学问题》,见《科学前沿的哲学探索》,辽宁人民出版社1983年版。

系统的结构信息量。不同的结构信息,系统整体结构不同,系统内部相互作用程度也不同,虽然组成系统整体的部分是相同的,整体的物质量等于部分之总和,但由于结构信息的非加和性,整体出现了部分所没有的新质,新的功能。把一堆零件按照一定组织方式和程序组装成一部机器,出现了孤立的部件所没有的新质,零部件虽然具有联结或传递能量等作用,但它们各自都不能成为一种生产力,而机器则可以进行生产加工,从而成了生产的要素,其原因就在于机器比零件包含有更大的结构信息量。结构信息的作用一方面表现为组织方面的力量,通过对系统输入的物质和能量按一定模式重新组合,使系统整体产生了新的质,新质又带来了新的量,有可能在某一量度上获得“附加量”。而另一方面则表现为转换物质能量方面的能力,虽然从总体上看转换前后在物质和能量是守恒的,但通过建立一个高度有序的,各部分协调同步的系统,就有可能把某些方面的量按照一定的目标集中到整体所需要的量上来,使系统整体在某一方面达到大于部分之和的输出量。因此,由于系统交互信息和结构信息,就有可能使系统整体在功能上产生叠加和互补。^①

综上所述,系统整体性原理揭示了:各个要素按一定方式构成的有机整体,其要素作为整体的部分,要素与整体、环境以及各要素之间相互联系、相互作用,使系统整体呈现出各个组成要素所没有的新的质,因而具有构成部分所不具有的功能的规律性,这就是系统的整体性原理的基本内容。如果仍然要借用亚

① 参见林康义:《系统中整体和部分的辩证关系》,见《哲学研究》,1982年第二期。

里士多德的某一哲学命题来表述这一原理的话，我们宁愿抛弃“整体大于它的部分之总和”这种表述，而用“整体不等于它的部分的总和”来简要地表述整体性原理。

第四章 系统的结构与功能

系统的结构与功能是系统科学的基本范畴。不管什么系统,是自然系统、社会系统、科学技术系统,还是思维系统,无不具有一定的结构。系统的结构是系统保持整体性及具有一定功能的内在根据。系统科学就是从系统的结构与功能的观点出发去研究整个客观世界。当代系统工程的方法已普遍地应用于解决工程技术、经济管理以及各类社会问题。在系统设计中,模型化是现代各类系统工程的基本部分,而建立模型的一个主要理论根据则是基于对系统结构的深刻分析和理解;系统目标的设计,也是工程系统所能达到的功能目标。可见,探讨系统结构与功能问题是理解系统的基本性质和系统方法应用的一个关键性环节。

第一节 系统的结构

一、系统结构的普遍性

我们所面对的客观世界,从微观到宇观,尽管非常错综复杂,但万事万物,无不表现井然有序,无不在一定条件下发生转化,它们都遵循着自然界的客观规律性。客观世界是物质世界,

物质的唯一特性就是客观实在性，这是建立在物质对于精神关系的特定前提上的哲学理解。但对于具体的物质来说，又都有它特定的存在方式，这就是物质结构方式。在客观世界中，没有非物质的世界，同样，也没有非结构的物质。与物质这一最普遍范畴相联系，作为物质的特定存在方式的结构，同样是一个普遍性范畴。

所以我们说，从宇观天体到微观粒子的一切层次的物质系统，都无一例外地存在着一定的系统结构性，如固态、液态、气态，在高温下物质处于等离子态，超低温下的超导态，超高压下的超流态等多种物质结构形式。这正如恩格斯所指出的，“不论人们关于物质构造可能采取什么观点，下面这一点是非常肯定的：物质是按物质量的相对的大小分成一系列较大的、界限分明的组，使每一组的成员互相间在质量方面都有确定的、有限的比值，但对于邻近的组的各成员，则具有在数学意义下的无限大或无限小的比值。可见的恒星系，太阳系，地球上的物体，分子和原子，最后是以太粒子，都各自形成这样的一组。事情并不会因我们在各个组之间找到中间性的成员而有所改变。”^① 恩格斯时代所讲的“以太”是不存在的，而一百年来，尤其是本世纪人类对微观世界认识的进展，已发现了比恩格斯时代更深入的微观层次，如粒子已发现了三百多种，还发现了比粒子更深的层次，即层子或夸克。现代天体物理学研究的进展又发现构成中子星的物质密度可能达到 10^{11} — 10^{16} 公斤/厘米³，这在地球上是不可思议的。所以对恩格斯上面的论述，可以概括为这样几点：第

^① 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社 1972 年版，第 162 页。

一,客观物质世界按质量的相对大小划分为组,组可以理解为属于同一层次物质系统;第二,当我们一接触到具体的物质系统时,总要涉及到具体物质系统内部的成分分析和比值分析,并且这种比值分析是不可穷尽的,而研究任何物质系统的这种组成关系,其实就是结构问题;第三,对于不同的组或层次之间,科学的发展,将不断地发现一系列中间环节(或中间层次),即证明了自然界的连续是由无限的非连续的层次所组成的。因此,我们所遇到的一切客体的结构,总是毫不例外地相对于一定层次,并进一步证实了上述观点,而不会使上面观点有所改变。

系统结构的普遍性观点,这是人类几千年长期探索和思考并通过科学实验证实的。物质结构观念起源于古代自然哲学时代的臆想和猜测。而对物质结构的研究基本集中在两个问题上。第一是物质由什么构成的?我国古代的五行说认为,金木水火土是构成宇宙万物的五种基本元素;古希腊哲学家认为是水火气土四种。第二个问题是宇宙空间究竟是连续的还是间断的?我国古代学者墨翟认为分到最小的单位称为“端”,到了“端”就再也无法分下去了。这与古希腊哲学家德谟克利特的原子论观点相类似,认为构成物质的最小单位是不可再分的原子。到了十九世纪,英国科学家道尔顿在建立他的原子论的时候,也认为原子是不可分的、不变的、完全坚固的。这在认识上有形而上学局限性。本世纪来,物理学打开了原子的大门和原子核的大门,证实了恩格斯的预言:“原子决不能被看作简单的东西或一般来说已知的最小的实物粒子。”^①也证实了列宁的预言:“电子

① 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社1971年版,第161页。

和原子一样，也是不可穷尽的。”^①现在尽管比粒子更低层次的夸克(或层子)尚未打开，但夸克(层子)结构模型已先后被提出来，宇观上黑洞结构模型也成为现代天文学研究的课题。我国古代学者公孙龙曾提出“一尺之捶日取其半，万世不竭”的无限可分思想，其实也是物质结构无限性、普遍性的朴素观点。当代物理学的发展，又深入到混沌态的结构研究，科学每前进一步，都是对物质系统结构的普遍性的不断证实，也推动了马克思主义哲学的世界物质性观点的丰富和发展。

物质系统除了空间结构外，任何事物又都有其产生、发展到灭亡的时间过程结构。如物质运动过程出现的某些振荡周期，生命系统中存在的生物钟等，就是物质系统的时间结构。

与物质相对立的精神系统，其实也一样地有它的结构，如思维结构，逻辑结构，语言结构等。

因此，没有非结构的系统，也不存在非系统的结构，结构与系统是不可分割的。

结构作为系统科学的一个基本范畴，已不同于通常作为动词用的构造等含义，而是指系统的“部分的秩序，”^②或者说，是指系统内部各组成要素之间在空间或时间方面的有机联系与相互作用的方式或顺序。现在“结构”一词已被广泛地应用到自然、社会和人的思维各个领域中去。对自然界领域的认识，应用了如宇宙结构、星系结构、地壳结构、生态环境结构、人体结构、生命大分子结构、原子结构、粒子结构、层子结构等；属于社会领

① 列宁：《唯物主义与经验批判主义》，人民出版社1960年版，第262页。

② 贝塔朗非：《一般系统论导论》，《自然科学哲学问题丛刊》，1979年第3期。

域的,如阶级结构、政权结构、经济结构、产业结构、区域结构、教育结构、人才结构、城市结构等;在思维领域方面,有符号结构、逻辑结构、语言结构,概念结构等等。科学研究不断揭示各种系统结构的要素的排列、组合的次序和方式。随着系统由低级向高级的演化发展,有序性愈高的系统,其结构的严密性、有机性也愈高。系统结构可以用不同的方式来描述:时间结构具有一维性;空间结构则具有三维性;如果把时空联系起来描述,则成为四维结构;人的知识结构则包含多维性,如自然知识、社会知识、生活知识、生理知识、外语知识、逻辑知识等等。描述的参数愈多,维数也愈多。

二、系统结构的特性

系统科学的“结构”概念,所揭示的是系统要素的内在的有机联系形式,而系统结构在整体上又有它的若干特性。

1. 系统结构的稳定性

稳定性是系统存在的一个基本特点。一个系统的结构一旦形成,就总是趋向于保持某一状态,这就是系统结构的稳定性。所谓稳定,就在于系统整体状态能持续出现。它既可以是静态稳定,也可以是一种动态稳定。由于受外界干扰,系统可能会偏离某一状态而产生不稳定,但一旦干扰消除,系统又恢复原态,继续出现原来的稳定。在系统中各要素稳定联系所形成的结构,又可分为平衡结构和非平衡结构。

凡是各构成部分之间的联系排列方式保持相对不变,这种系统结构称为平衡结构。如晶体系统,这类系统各个要素有固定的位置,其结晶体的物性依晶体内部原子或分子的排列方向

而异,即各向异性,其结构稳定性非常明显,一旦晶体结构形成,其系统内部的分子的相互作用就不会随时间而改变。

凡是系统各构成部分对外界经常保持着一定的活动性和功能,系统处于必须与外界不断进行物质、能量、信息交换才能保持有序性的系统结构,称为非平衡结构。这种结构,与晶体结构截然不同,不仅各要素之间的相位是可改变,而且组成要素总是处于流动中。这类结构还存在两种情况,一种是有机程度高、结构严密的系统,其系统中各要素的结合虽然不能随便改变,但又保持着与外界经常的物质和能量交换的特点,即动态稳定。这种结构的动态稳定是这种非平衡结构系统能够自我保持并对环境发挥功能的一个必要条件。如生物体就是属于这类非平衡结构。一方面,生物体与外界之间不断进行物质、能量以至信息交换,从外界吸取负熵流以抵消自身的熵增,生物体的同化、异化作用,不断进行新陈代谢的过程,就是维持结构稳定的基本条件;另一方面,决定生物体的遗传基因如果发生突变,又会导致生物体的变异,象决定人体的血红蛋白的结构基因如果发生突变,则会造成遗传性的贫血症。所以,生物体要正常生长,就不能破坏它的稳定结构,任何一个基因的改变,将会影响整体循环的正常运转,造成疾病以至死亡。当然我们还不能忽视这样一个情况:系统稳定结构的微小变化会引起系统的进化。本世纪五十年代以来,生物学进入了从微观水平上揭示生命活动现象和规律的新时期,出现了一种分子进化学说。这个学说认为,根据核酸、蛋白质分子一级结构上的微小变化,就可以说明生物性状的所有变异,进而说明进化的原因。所以研究动态系统的结构稳定性与变异性如何相辅相成,则是现代生物学以至其他有

关科学的重要课题。非平衡结构还有另一种情况，就是对于那些非严密结构的系统，其结构稳定性又有不同的表现。非严密的非平衡结构系统，其组成部分或要素及其位置总是处在变动之中。例如，城市中的流动摊贩一年中所采购的货物和销售的对象总是不断地变换着，有很大的随机性，完全不象人体脏器那样有着相对固定不变的位置，更不象晶体系统那种平衡结构。那么，又如何解释它存在着结构稳定性呢？我们知道，商业流动摊贩在他的经营活动过程中，虽然其采购的货物和销售的对象是不断变换的，是随机的，但总离不开生产者、基本流通渠道和销售对象这几个环节，尽管这个过程中各要素的联系有很大的偶然性，但要素之间的联系又是有机性的，保持着一种稳定的必然联系方式，因而又可以通过数理统计方法从整体上找出随机现象背后所呈现的严格的非偶然的规律性来。所以，这种联系方式也是属于系统结构稳定性的一种表现。所有非平衡结构的稳定性都是属于动态稳定性。而在社会系统、工业系统、交通运输系统等人工自然系统中，与自然系统又有着许多类似点和可比性，它们都属于动态稳定型的非平衡结构系统。

2. 系统结构的层次性

系统结构的层次性包括等级性和多侧面性两重含义。等级性是指任何一个复杂系统，都可以从纵向上把它分为若干等级，即存在着不同等级的系统层次关系，其中低一级的系统结构是高一级系统结构的有机部分。系统结构的多侧面性则是指任何同一级的复杂系统，又可以从横向上分为若干互相联系和相互制约又各自相对独立的平行部分。

自然系统的等级性是极其明显的，宇宙就是一个存在无限

等级层次的最大巨系统。现代科学把宇宙整体结构划分为三个基本层次，即宇观层次、宏观层次和微观层次。从太阳到银河系以至河外星系的范围，属于宇观层次，是相对论力学研究的主要领域。在太阳系以内的行星、地球及一般宏观客体系统的范围，属于宏观层次，是牛顿力学研究的主要领域。在分子以下到原子、原子核、粒子、夸克(或称层子)等领域，则属于微观层次，是量子力学研究的主要领域。

与物质运动的基本形式相联系，也可相应地划分为五种基本结构形式，即机械结构形式，物理结构形式，化学结构形式，生物结构形式、社会结构形式。其中高级结构都包含着低级的结构形式，但又不能归结为后者的加和。以生物运动结构形式来说，又可分为七个结构等级层次，即亚细胞、细胞、器官、机体、群体——种、群落、生物圈。高级层次的系统结构，有着低级系统结构所没有的结构特征；而每个层次又都同样遵循着辩证法的普遍规律，以及生物运动规律和每个结构层次的特殊规律。

在社会系统中，人们更熟悉等级层次。在国家体制上，从全国到省市、县、区、乡，部队编制从军、师、团、营到连队，几乎可举出无数的事例。

系统结构的多侧面性也是屡见不鲜的。如农村大系统可分为农村生态系统和农村社会系统。以农村社会系统来说，又可分为农村经济、农村政治、农村科技、农村文教、农村宗法等分系统。农村经济是低于农村社会系统的一个等级，但它也可以进一步分为农业经济、农村工业、农村商业、农村服务行业等分系统。它们彼此属平行关系，又相互制约，彼此既相对独立，又相互依存。在一个单位中，党、政、工、团也是分系统，而每一个分

系统的结构,还可以作进一步的划分。如党、政、工、团的领导阶层中,其领导班子成员结构同样体现它的多侧面性。

总的来说,系统结构是指一定层次上的结构;而在每一种基本结构形式中,按系统各组成要素的纵向联系与横向联系,或是纵横交错的联系,按其联系程度和方式也即是层次性去划分,以对系统进行描述,从而发现系统的运动变化的规律性。这类属于研究系统组织理论方面的问题,是十分重要的。研究了系统结构的层次性,就可以帮助人们根据各类系统结构层次的特殊规律去进行科学预测,扩展视野,发现新事物,以便进行综合治理和合理调整。

3. 系统结构的可变性

在系统世界中,任何类型的系统结构,都不会是绝对封闭和绝对静态的,任何系统总存在于环境之中,总要与外界进行能量、物质、信息的交换,系统的结构在这种交换过程中总是由量变达到质变,这就是系统结构的可变性,也即是指它的动态性和开放性。以元素来说,每一种元素都有一定的结构,在人们已发现的 107 种元素中,属于地球上存在的天然元素有 91 种,但任何一种元素的结构都不是一成不变的,而是随着元素与外界的相互作用而不断处于转化的过程。不同元素的开放性程度是不同的,有些元素的结构极不稳定,半衰期极短,如 107 号元素 $[107]^{261}$ 半衰期只有 2 毫秒,而有的元素半衰期达几十亿年,甚至更长。在地球演化过程中有一部分半衰期在 10^6 — 10^{10} 年的元素,其结构发生过天然的核转变,为地球演化提供了能量。所以从原则上说,没有一种元素,它的结构是绝对不变的,只有开放性程度的差别而已。前面指出系统结构的稳定性是相对的,

这里阐述的系统结构的可变性则是绝对的。

在社会生活中，每一时代的社会结构都是在变动中。尽管中国几千年封建专制的君主们一直在追求建立永恒的超稳定的社会结构，但结果与他们所追求的长生不老丹一样，愿望总是破灭，封建王朝没有停止过更替。正象沧海桑田一样，社会结构总是在微小变化的积累中酝酿了一次又一次的重大变革。随着社会生产力的发展，科学技术和管理的总革命，反映社会分工的劳动就业结构以至整个社会结构就相应地进行了一次又一次的变革。

当前我国产业结构研究的一个重要方面是农、轻、重的结构关系应当按什么比例才算最佳？过去曾着重于从农、轻、重三者的总产值角度来研究三者的比例关系，而忽略了从三者内部结构如何向优化方向发展的基础研究，也未能从全球发展战略，特别是适应新技术革命的远景战略角度来变革两者的内部结构。因而可以说，过去的研究法仅是一种静态的结构观点，这种只注意量的比例忽视结构性的质的要求，只注重眼前的、短时期的高速度，不注重长远的战略目标的结构研究，在一个时期内曾贻误了我们的工作。可见认识一个系统结构关系的变化规律，特别是实现优化发展的规律是极不容易的。目前，我国与许多国家一样，从预测科技发展的未来趋势和我国实际出发，决定优先发展若干高新技术和新兴产业，如微电子技术和信息技术，生物工程技术，自动化和机器人技术，新材料和新能源技术等，这将为发展未来的优化技术结构和产业结构打下基础。从思想方法来说，这就是一种可变的、动态的结构观点。

可见，不论自然界、社会还是一个人，任何系统的结构在本

质上是开放的,总处于不断变化过程中,这是系统与变化着的外界相互作用的必然趋势。而目前的结构状态,则是系统中各组成要素相互作用及系统受周围环境影响的结果;同时,目前的结构状态,又是形成未来的新结构的基础。马克思在分析社会经济结构时就是坚持了社会生产力的变化将引起社会经济结构发展变化的观点。他指出:“我的观点是:社会经济形态的发展是一种自然历史过程。”并且说:“甚至在统治阶级中间也已经透露出一种模糊的感觉:现在的社会不是坚实的结晶体,而是一个能够变化并且经常处于变化过程中的肌体。”^①这一基本思想同样适于指导我们认识一切系统结构的动态性和开放性。不论是研究经济结构,还是其他系统的结构,都必须注意系统结构内部中各要素相互作用的动态性,更不能忽略系统结构与环境相互作用的开放性,否则系统研究必将陷入形而上学和经验主义,只有坚持系统结构可变的观点,才是唯物辩证法分析事物的科学态度。

4. 系统结构的相对性

系统结构的可变性是绝对的,但系统结构的稳定性,系统的结构和要素之间的关系,则都是相对的。我们所认识的客体系统,都有一个产生、发展到转化的过程,系统结构一旦形成,到它转化为其他系统之前,总存在一个结构的稳定期,这就是一种相对的暂时的稳定性。系统的结构本质上都是动态的、开放的,但从一定角度上去认识它的时候,就存在着暂时的静态和暂时的封闭态。这种暂时的、稳定的、封闭的系统结构特性,都是有条件的,相对的。

^① 《马克思恩格斯全集》,第23卷,第12页。

客观世界是无限的，系统的结构形式也是无限的。在系统结构的无限层次中，高一级的系统内部结构的要素，又包含着低一级系统的结构；复杂大系统内部结构中的要素，又是一个简单的结构系统。结构与要素是相对于系统的等级和层次而言。例如在联合国的成员系统中，每一个国家都是一个要素，而每一个国家实际又是一个大系统。一个国家中的省、市、县，相对于高一级的系统是要素，而本身又是一个结构系统。甚至在生物体中，每一个细胞是一个要素，但是在细胞王国中，又包含着生命大分子的复杂结构。对于过程结构系统来说，也不例外，象人类历史上经历原始公社时代，奴隶时代，封建时代，资本主义时代和社会主义时代，每个时代都可以看作整个历史过程结构的一个要素，而每一个时代，又可以看作一个复杂的过程结构系统。所以，系统结构的层次性，也决定了系统结构与要素的相对性，把握了这一点，则人们在认识事物时，可以减少简单化和绝对化，既注意到把一个子系统看作大系统结构中的一个要素来对待，以求得统一的步调，又注意到一个子系统不仅是大系统中的一个要素，它本身又包含着复杂的结构，不能一刀切，要注意区别对待。但一般说来，高一级的结构层次对低一级结构层次有着更大的制约性，而低一级结构又是高一级结构的基础，它也反作用于高一级的结构层次，它们之间的关系是辩证的。这样，研究系统结构的相对性，就具有方法论的意义。

三、结构分析与结构模拟

现代科学研究的一个首要目标是弄清被研究对象的有序化结构。可以说，人类历史上一一直在探索一切客体系统的结构。古

代的人们很早就注意观察天象，探测天体系统的结构以及自己生活的地球在天体系统中所处的地位。从托勒密创立的地心宇宙体系理论到哥白尼太阳中心说的宣布，说明人类对天体结构的认识在逐步深化。1755年，康德在《宇宙发展史概论》中，又指出了宇宙中存在无数的恒星体系，这些恒星系又结合成更高一级的体系。康德阐述的原理，已接近于宇宙在空间上是无限的，在结构上是无穷的思想。研究天体结构，仍然是现代宇宙学的一项重要任务。在微观方面，人类现在已打开了原子和原子核的大门，并正在打开粒子的大门。在生物学方面，以往只注意研究生物行为的宏观变化，自本世纪五十年代以后，分子生物学的发展，已深入到生命大分子的结构层次。生物学的进一步发展又将进入到电子生物学或量子生物学阶段，从研究电子运动规律的微观层次来阐明生物的结构与功能的关系。可见现代宇宙学、基因工程和粒子的研究等，都涉及探索天体结构、生命结构、物质微观结构的科学前沿。

但是人们要一下子弄清研究对象的结构这是不可能的，科学上在结构未能弄清之前，暂把被研究的系统结构称为黑箱。就是说，我们只能知道系统的一些信息、能量、物质的输入值和输出值，而不能确切地知道它的内部结构及内部变化。或者说，由系统的功能分析去判断系统的结构。

这里要注意的是，对系统结构的研究，实质上是一种使形式暂时摆脱内容，以系统形式为特殊对象的形式化研究方法。虽然在具体分析系统和进行系统结构设计时，也要涉及系统结构要素的基质，要选择系统结构达到一定性能要求的材料，这是因为研究问题时形式不能完全脱离内容。但结构研究方法则是属

于形式化方法的范围，它的基本任务是研究系统结构的有序形式，从量的角度去研究系统。只有当一种系统的结构机理被弄清楚了，人们才可以进行结构复制、结构还原和结构模拟。

结构复制是在弄清自然结构机理基础上，由人工的方法复制出与自然结构相同的系统结构来。例如，1965年我国科学家就是根据英国生物学家桑格在1965年已弄清楚的牛胰岛素的分子结构基础上，在世界上首次实现了蛋白质人工合成，这就是属于结构复制。象生物体中的酶，它是一种高效的催化剂，某些酶催化剂其效率比催化相同反应的非生物体的催化剂高达十万亿倍。也就是说，以非生物体催化剂要经过一百万年才能完成的化学反应，用酶催化只要一秒钟就完成了。人工复制生物酶如能获得成功，将会带来科学技术的重大革命。

结构还原同样要靠弄清自然结构的机理，但那是以自然系统中的个别残留成分为依据，通过相关关系去推出原自然系统的整体结构，然后再将整体还原出来，这在现代考古研究中是普遍运用的一种方法，我们可称之为结构还原法。比如现代考古学中往往依据发现的那么一个牙齿或一节骨骼的化石，考古学家就能够复原出人猿、恐龙及其他古生物的原貌来，并且还能大体描述这些生物体的习性及生活的环境。所以关于现实客体系统的结构研究，对人类的产生、生活和科学研究都是极其重要的。

结构模拟虽然也必须以弄清自然系统的结构机理为前提，但那不是复制，也不是还原，而是设计一种比较简单的结构去模拟另一种比较复杂的结构系统。正如测定人体内部变化的心电图、脑电图设备，就是大体上能重现人体内部结构及其变化，但

这比人的心脏和脑结构要简单得多。

总之,只有在结构研究的基础上,才能从事结构复制、还原和模拟,才能理解系统的功能。

第二节 系统的功能

我们研究系统的结构,是为了认识系统之所以能够对外界发生作用的内在根据。功能是与系统结构相联系的范畴,系统的结构与功能的关系是不可分割的。

一、系统功能概念

我们把系统内部各要素相互联系和作用的方式或秩序称为系统的结构,与此相对应,我们把系统与外部环境相互联系和作用过程的秩序和能力称为系统的功能。系统功能体现了一个系统与外部环境之间的物质、能量和信息的输入与输出的变换关系,以及包括了改变被作用对象的秩序。如图所示。



4.1

系统与外部介质的相互作用,在系统输入与输出时均存在,其变换过程存在于系统内部的结构中,而输入与输出时对外部介质的相互作用则是系统的功能。不能认为仅仅输出时才表现了系统的功能,因为输入也是相互作用的结果,同样体现了系统的功能。

这里必须指出,系统的功能与系统的行为不能完全等同。所谓行为,是系统结构整体与环境相互作用所引起的系统与环境协同效应的变化过程,因而,系统行为可理解为系统活动与环境介质相互作用过程中,系统自身的状态变化以及引起环境状态变化过程的综合描述。任何系统行为都可以从系统自身的结构及其与环境的适应关系中得到解释。而系统的功能虽然也是在系统整体与环境介质相互作用过程中表现出来的,但它不着重于描述系统与环境相互作用后的状态变化,而是着重于描述在系统与外部环境介质相互作用的输入或输出过程中,对外部环境施加影响和作用的能力。所以,系统功能可以理解为系统结构整体与环境介质进行物质、能量、信息交换的秩序、功效与能力的描述。

总之,系统的结构是系统内部各要素相互作用的秩序,而功能则是系统对外界作用过程的秩序。归根到底,结构与功能所说明的是系统的内部作用与外部作用。功能是一个过程,这一范畴揭示了系统外部作用的能力,因而是由系统整体的运动表现出来,是系统内部固有能力的体外体现,它归根到底是由系统的内部结构决定的。系统功能的发挥,既有受环境变化的制约方面,又有受系统内部结构的制约和决定方面,这正体现了功能对于结构的相对独立性和绝对依赖性两重关系。

二、系统功能的特性

1. 系统功能只有在系统与环境相互作用过程中才能体现
一个系统,离开了内部要素之间的有机联系就不能成为有机结构,实际上也就无所谓系统。一个系统整体,如果与环境介

质之间没有相互作用，实际上也就无所谓功能。而相互作用只能是在系统与环境的运动变化过程中才能够发生，离开系统的动态过程，系统功能是无从发挥的，功能只能在“流”中才能表现出来。象机器系统，只有当它直接加工对象物时，机器系统的功能才得以体现，这就是我们通常说的，当机器投入生产过程的应用时，潜在的生产力才转化为现实的生产力。

2. 系统功能比系统结构有更大的可变性

系统功能与系统结构相比是更为活跃的因素。一个系统对外部介质发挥功能总要遵循一定的规律，表现为一定的秩序。随着环境条件的不同，将相应地引起系统功能的变化。一个系统的基本结构关系在一定阈值内总是稳定的，但功能则不同，外部物质、信息、能量交换只要有所变动，此时系统与环境的相互作用过程、状态、效果都会随环境条件的变化而变化。所以一个系统发挥功能的过程，就随着环境条件的变换而相应地调整它的程序、内容和方式，以至趋向于不同的终极效果。

3. 系统功能与系统结构一样存在着相对性

由于客观世界无限广大，反映系统内部相互作用的系统结构与反映系统外部相互作用的系统功能之间又没有绝对不可逾越的界限。在一个大的系统内部，其要素之间的相互作用本来是属于系统结构关系，但如果把每个要素或子系统作为一个系统整体来考察，则子系统之间的相互作用又转化为独立子系统之间的功能关系。好比人的肌体中存在着的各种消化系统、经脉系统，研究它们的运动规律时，往往又赋予它们以相对独立的性质，人体中各种子系统之间彼此又成为内环境，其相互作用关系则成为功能关系。所以不能认为功能关系就是绝对的功能关

系,结构关系就是绝对的结构关系,它们之间总是在一定条件下互相转化,问题是看环境如何确定而言。可见,系统的功能也存在着相对性的特点。

三、功能分析与功能模拟

设计出一种结构简单的功能系统来模拟结构复杂的功能系统,这种用另一种结构模仿原型功能的方法,是一种功能模拟方法。贝塔朗菲指出:“不同领域存在着结构相似的定律,就有可能把比较简单、比较熟悉的模型运用到比较复杂、不易处理的现象上去。所以,从方法论上说,一般系统论应是激励和抑制把一个领域的原理转移到另一领域的重要方法。”^①贝塔朗菲称这种模拟方法的特性为“科学中的同型性”。显然,功能模拟方法与结构模拟方法一样在科学技术上早已得到应用,它们都是基于类比,它们的应用都是为了便于简化问题,便于实验,根本目的还是为了便于获得需要的功能。象物理学中的张弛振荡原理被应用于理解生物学领域发生的许多现象,因为同一个振荡原理,既适用于物理系统,也适用于生物系统,有其结构上的可比性,它们在逻辑与数学形式上能够相通。同一道理,一种功能又可以由不同的结构来获得。前者属于结构同型,而后者则属于功能同型。

人们在弄清系统结构基础上,不仅可以进行结构复制和还原,还可以进行功能模拟。本世纪迅速发展的仿生学,就是通过弄清生物体结构机理,然后设计不同的以人工材料为基础的模

^① 贝塔朗菲:《一般系统论的基础、发展和应用》,第三章。

拟结构去模仿生物体的功能，为人类服务，这就是仿生学的任务。比如建筑工程中经常运用的双曲拱桥结构，现代潜艇外壳设计，响尾蛇导弹，声纳装置等大量新的技术成果，都是基于仿生原理设计出来的。所以研究生物、包括古生物的结构，就能为现代化建设提供极重要的参考。

现代电子计算机运算速度已能达到每秒几十亿次以上，可是信息的输入和输出的速度相当慢，对图像识别能力较差，这又是计算机应用的薄弱环节。1975年，美国最大电子中心贝尔电话公司为了探索研究新一代计算机的新思路，专门成立大脑研究室，以便从人和动物的大脑结构中得到启发，设计新型模拟计算机。象人脑皮层有100多亿个神经细胞，或叫神经元，每个神经元又与1000个其他神经元相联系，形成极为复杂的神经网络结构。如果能认识这些神经元的功能差别及彼此具体的连接方式，从而设计出人工结构系统去模拟人脑更多功能，这必将推动整个科学技术的新飞跃。

第三节 系统的结构与功能的关系

当我们弄清了结构与功能的基本含义后，我们还必须进而着重分析系统结构与功能的多种相关关系。

一、组成系统结构的要素及其素质对系统功能的影响

组成系统结构的要素是决定一个系统功能状况的最基本的条件。这是因为，系统的组成要素之间存在一定内在联系并形成某种组织方式而体现为系统结构，一旦结构形成，它就对环境

118

118

产生整体效应,或是适应环境,或是改变环境。组成系统结构的要素一旦有了改变,就会影响到系统整体结构组成方式的改变,这必然使系统整体功能带来影响。现实世界中,这类事例是很多的。例如,干部队伍的调整,其目的是为了增强干部队伍的战斗力,适应四个现代化发展的要求。面对这项重要的调整工作,我们看到,一些有远见的决策者,都极其重视吸收优秀的科技人员进入领导班子,狠抓广大干部的培训,同时通过适当方式,调整掉一些身居其位不谋其政的不称职人员或多余人员,这些都是为了使组成干部队伍这一系统结构的要素的素质有较大的提高,使干部素质更富有生气和活力,从而为系统整体功能的提高打下坚实的基础。不少单位调整干部后的可喜变化充分说明了这一点。可见一个系统结构要素的变化,对系统功能的影响是很大的。

二、系统要素组合方式的改变将影响 系统整体功能的发挥

决定系统功能的条件除组成要素外,系统中各要素排列组合方式的变化,都会使系统整体的关系发生结构变化。在组成系统结构要素相同的情况下,由于各要素之间的排列组合方式的不同,决定了各组成要素在整体结构中的不同地位和作用;而一旦系统结构有某些改变,各组成要素在整体结构中的地位和作用也会随之变化,从而引起系统功能的改变。

本世纪来,由于分子生物学的发展,我们已知道从最下等的变形虫直到人类,在构成遗传基因的 DNA 上排列的物质成分都是相同的,只是由于其组合方式和数量的不同才形成千千万

万生物的不同遗传物质。因而从原则上讲,了解了生物的结构,什么生物都是可以改造的。现代国际上出现一种生物技术公司新行业,遗传工程师就是研究如何改变生物的遗传结构。将来终有一天会把固氮基因引入禾谷类作物细胞中去,获得自己能供应氮肥的农作物新品种。

再以能源结构为例,从当前世界能源的结构来看,原子能在各种能源中所占比例很小,但它的能量却是很大的。原子能就是核结构发生变化时发出的能量,它包括聚变能和裂变能,比起化学能来,其效能大几百万至一千万倍。所以,搞清楚核结构变化规律,以及研究实现这种变化的途径,就将会带来全人类能源结构的根本变化。到那时,大自然的原料,如煤、石油等等,将会从一般燃料中解放出来,而发挥更大的功能。

在复杂事物中,往往有一些不合理的结构会导致对系统功能的削弱。如果能研究结构变化带来功能变化的规律,研究变革结构的方法和技术问题,那么对系统结构进行合理的变革,就能给人类带来极大的效益。

人类社会的改革就其实质来说,就是在社会大系统内部进行结构的调整。这种调整,是通过要素的组合方式的改变,以达到涤除旧弊,进一步解放生产力的社会目标。一旦社会系统中的组成要素在新的结构中改变了地位,形成新关系,它们就能发挥不同作用,迸发新的活力,以至从整体上发挥出新的结构功能来。当生产力的发展受到生产关系的局限,小改革将无济于事时,就会引起大的改革,以至社会革命,使社会结构进行根本性调整,由基础的变革,引起上层建筑的变革,由经济体制改革发展为政治体制的改革。

可见,要使系统获得更好的功能,就不能仅停留在提高单个要素的素质方面,而要在一定要素的基础上,致力于改进系统的结构,搞好结构改革,这一工作做好了,往往能达到事半功倍的效果。

三、适应不同的环境条件,同一结构 能发挥多种的功能

因为任何系统总离不开环境,一定的系统,在不同的环境中将与外界发生着不同的相互作用,因而同一结构就发挥了多种的功能。当然,在一定环境和条件下,一个系统结构上能有一种起主导作用的功能。但这往往又给人们形成一种错觉,以为一个结构系统,只有一种功能,忽略了系统对不同的外界环境能发挥多功能的特点。比如学校将为社会培养人才,它既传授知识给学生,又培育学生良好的道德品质和健康体魄。可是过去却曾出现过许多片面理解的现象,把学校看成单纯传授知识的场所,只片面追求升学率和拔尖子,影响了学生身心的健康。这种片面性,用系统的观点来看,其原因就是忽略了学校是一个多功能的结构系统,既教书,又育人,培养学生德、智、体全面发展都是学校的任务。在发展生产上,也出现过这种片面性。确实,现代电力工业、化工工业、原子能工业、汽车工业等许多工业部门给人类带来了巨大的利益,但不能否认,新兴工业又有一种有害的功能,往往引起了生态环境即它所存在的更大系统的结构性变化,破坏了生态平衡。有人预计地球现在大气中由于二氧化碳的增加,温度在不断上升,在下一世纪,将会导致冰川融化,那时会淹没大量土地。这类历史的教训,是屡见不鲜的。恩格斯

就曾于一百多年前讲到美索不达米亚、希腊、小亚细亚等地的居民为了想得到耕地(取得种粮食的功能),砍光了森林(失去了生态调节的功能),结果破坏了生态结构,使今天许多地方仍然是荒芜不毛之地,受到了自然界的报复。

所以要注意同一结构系统与其所在环境相互作用的不同对象的特点,注意到同一结构中多种功能,包括有害功能的关系,不能只注意到系统结构一个方面的功能,生搬硬套,否则不仅不能带来有益的功能,反而会导致相反的结果。

四、同一功能还可以通过 不同系统结构去实现

物质世界的变化发展是极其复杂的,与同一目标可以通过不同途径去达到一样,不同的组成要素与不同的结构方式,可以有相同的功能和结构,这是一种异构异因同果的现象。这种现象在自然界或社会中是很多的。杜里舒的海胆实验新发现的现象表明,不论一个海胆分割为二,或二个海胆压合为一,都最后发育为正常海胆,这在机械论和活力论看来,都是不可思议的。其实从系统观点看来,不同的结合方式,即可以出现不同结果的组织效应,也存在着相同结果的整体效应的可能性。海胆实验表明的这种异因同果现象,在自然界中比比皆是。苍蝇用复眼来辨别环境;蝙蝠没有眼睛,用发射超声波的反馈来辨别环境。墨鱼用喷射墨汁来躲避敌人的袭击,许多昆虫用保护色也达到同样的目的。在大千世界上,绝对相同的结构几乎是不存在的。异构异因同果现象正表明了特殊之中存在着一般性,在个性中存在着共性这一普通真理。

同一功能，可以由不同的结构来实现，可以进行功能的模拟。以计时为例，从古代的日晷到机械手表、石英电子手表，结构虽不同，但同样都具有计时的功能。在人类历史上，计算方法也进行过多次改革，十进制、十二进制、二进制，这都是能得到运算功能的不同运算结构系统。至于运算工具也在不断改进，象算盘、计算器、现代计算机等，都有不同的结构系统。当然，每种结构系统的改进，都将带来更多的优点，发挥出更大的功能。另外，人们总是经常地寻求设计一些简单、方便、低廉的代替性结构系统去实现某些复杂的、难以取得的或代价昂贵的结构系统，来获得同样的或更好的功能。这种把着重点放在达到同样的功能而不着重于结构是否一致或类似的研究，都是属于功能模拟的范围。

现代系统工程中为了实现最佳化设计，往往设计多种模型以模拟同一的系统功能，并从中选择最优结构。有些设计，将是一代一代的改进。象计算机设计就是模拟人脑的记忆、推理、运算的功能。从1946年美国宾夕法尼亚大学研制世界上第一台电子式数字计算机以来，科学技术工作者致力于改革计算机的元件和结构系统，先后发展了晶体管、半导体集成电路、大规模集成电路、超大规模集成电路和以研究与开发高级智能为目标的第五代电子计算机。由于计算机元件和结构的改进，体积变小了，结构简化了，而功能模拟方面却更加逼近人脑，运算速度和记忆功能远远胜于人脑。可见达到同一功能，完全可以由不同要素和不同结构系统来实现，这也是大量生活和科学技术发展所证实的道理。

五、系统功能的发挥既是结构稳定的条件， 又是结构变化的前提

系统与环境相互作用而实现一定的功能，这是通常维持系统结构稳定的必要条件。我们通常说，“流水不腐”，“户枢不蠹”，反映的就是这个原理。因为水处于流动状态是水质结构保持不腐的条件。门轴经常转动，则是保持不受蛀蚀的条件。但这仅是问题的一个方面。还必须看到另一方面：系统在与外部环境相互作用过程中，又促进了自身结构关系的变化。究其原因，是由于外界环境对系统输入的物质、信息和能量一旦有了变化，就会引起系统要素之间出现某些涨落现象，即各要素的地位、作用与关系出现变化。如果外界环境对系统输入的物质、信息和能量的变化较小，则要素之间出现的涨落较弱，由微涨落带来的相干作用的结果会导致结构稳定性的振荡，以至出现某些结构性的改良。如果外界环境对系统的输入变化很大，则会出现大涨落，甚至巨涨落，即原有结构或是出现了向新结构转变，或是恶化和瓦解。这样，先由于系统功能的变化而终于引起系统结构的变化，功能变化成为系统结构变化的前提条件。环境总是在变化的，环境的变化，通过影响功能的变化而导致影响系统结构的变化。反之，把一种系统结构看作神圣不可侵犯的，甚至是万古不变的东西，则会限制系统功能的发挥。所以，系统发展到一定阶段，总是由于功能变化的影响，而推动系统结构作自发的或者自觉的调整。在生命结构系统长期进化过程中，许多不适于环境的结构都被淘汰了，比较完善的结构方得以保留和进化。可见结构变化与功能变化的关系是极其密切的，在我

们所面对的实际系统中，结构与功能的实际关系只能是动态变化关系。

除了上述结构与功能存在多种关系的分析外，研究结构与功能关系原理及方法在实践上的应用时，还必须注意三个先决性的条件。首先是取决于客观事物存在的复杂程度。其次是取决于我们对它的认识程度。由于人类认识能力的限制，有些过于复杂的事物很难测度，人们就难于用概念构思和定量的数学方法来描述对象系统有序特性和变化关系。第三是社会要求的程度。如果面对的客观事物的结构、功能研究对于社会是至关重要，则社会会集中人力、物力、财力，发挥最大的主观能动性去攻克它；并且科学技术的发展也表明，关于许多复杂的大系统的结构与功能关系的研究，象人口问题、城市问题、能源问题等，需要自然科学、社会科学、技术科学的协作结合，才能事半功倍的完成研究任务。

第四节 不同系统之间结构变革的相关性

上面研究结构与功能的相关关系，这仅仅是系统与环境相互作用的一个极重要方面。但一个系统与其他系统之间，由于各自都处于动态变换过程，任何一个系统的结构变革，又会通过系统之间相互作用的功能关系而影响到参与相互作用系统的结构变化，这就是系统之间结构变革的相关性。所以还必须进一步研究不同系统结构变革相互影响的各种情况及其规律性。

一、由于环境系统的变革导致 从属系统结构的质变

由于环境变化而引起系统自身与环境之间功能关系的变化,从而带来一些系统结构的进化或衰退,这在自然界中是常见的。恩格斯曾描述过在古猿生活的远古年代,由于地球大气环境的剧变,古猿赖以生活的森林日趋减少,不得不下地求生,这样下肢活动逐渐增强,便缓慢地学会了直立行走,长期群居又彼此增加了信息交换,食物的改变更加速了大脑的进化,这就是生态环境结构变化对古猿生物肢体结构进化的影响。有时一些环境变化还会导致某些系统结构进化的中断以至结构毁灭。如火山爆发曾毁灭了意大利的庞贝;撒哈拉大沙漠中的古代殿宇遗迹,都是环境恶化而导致城市无法继续维持,那里居民迁徙他乡,古城也就被沙漠所吞噬。考古学者曾发现了大量的恐龙化石,这是亿万年前由于地球上曾遭遇一次至今尚未完全揭晓的巨大灾变,而导致植物减少,恐龙灭绝。现在人类已从自发开始进入自觉的年代,已懂得那种为了暂时利益而毁灭森林是一种愚蠢行为,必然要遭到大自然的报复。现代未来研究和预测,就应当探索由于人类社会系统,特别是探索产业结构变革和城乡结构变化之间的相关关系,以及这些变革引起的全球性结构变化的关系。

二、同类系统中,一个系统的结构变革 会引起其他系统的结构变革

这在社会系统中表现更为突出。由于系统发展过程的不平

衡,总有一些子系统发展快些,另一些日趋落后,以至在竞争中被淘汰,如商品竞争就是如此。为了在竞争中避免淘汰的厄运,各个系统都注意调整自身的结构,以适应变化的环境,如产业部门总是注意设备更新和管理体制改革。这方面工作做得好的,就能超前发展,其他同类系统就显得相形见绌。但有时一个系统由于结构与功能发展的限制,无法通过自我变革去适应这种变化,这时就必须寻求与其他同类(甚至不同类)系统的协作,完成结构性合作,借以彼此增进自身生存与发展的竞争能力。在这个合作过程中,由于结合后的大系统对参与系统加强了渗透和影响,使参与系统只保留相对独立性,或是失去独立性,这就是参与协作系统所经历的结构变革过程。比如本世纪下半叶以来,高技术的发展促进了许多产业部门的技术更新。象传统的机械技术与电子信息技术的结合,出现了一些新的高技术产业结构,如机器人产业部门等。而高技术又反过来促进了传统技术部门技术结构的全面更新。可见,由于同类系统之间的竞争与合作,一个系统结构的变革将会引起其他系统的结构变革,还可能导致创新系统结构的产生。

三、完全不同类型的系统结构 变革也存在相互的影响

如果说,上面所述的机械技术与电子技术的结合基本上还属于技术这个大的范围之内不同类型的协作。那么,如果超出技术的大概念,在技术结构变革与社会结构变革之间是否存在相关性呢?其实也不例外,技术结构与社会结构是完全不同的类型系统,它们之间也通过一定中间环节而相互联系和制约。

历史发展的无数事实告诉我们，重大技术发明总是或迟或早地推动人类社会生产力与生产关系的变革。首先是由于科学技术的生产力功能决定了科技结构的发展将推进社会结构的变革。技术进步过程总是由量的积累到质的飞跃。一方面，技术进步的速度和进程受到社会经济规律的制约而呈周期性；另一方面，由于技术的生产力功能，又会反作用于社会结构，以至成为社会变革的强有力杠杆。正如蒸汽机动力革命，电力动力革命，都促进社会各个产业部门的联合协作。技术革命的结果，推动了资本主义向垄断过渡，出现了一系列社会结构的变革。如新的银行制度的出现，使资本积累不再是工场时代只靠企业主的节俭筹资，而可以靠全社会的储蓄，资本家借助于信用制、银行制而使社会上一切可供使用而未利用的资金让自己支配。由于应用新技术使生产规模扩大，又出现了股份公司，从而导致管理阶层与所有权的分离和产业经理制的产生。而银行制与信用制的发展和股份公司的扩大，在社会上又形成了办公人员等的白领阶层。当代新技术的发展，又将导致一些传统产业部门出现结构性失业，国家结构系统也相应的要作出新的划分，以至重新安排社会的就业结构。而决策的科学性、技术性的加强，使大批科学家、经济学家更直接参与政治活动，引起社会决策核心的变化。新科学技术发展与产业革命，又使整个社会知识结构阶层日益出现重新组合的趋势。可见，技术结构的变革将直接或间接地引起现实的与潜在的技术与社会结构的综合、分化和发展。

总的说来，不同系统结构的变革和发展不是绝对的、孤立的，而是存在着内在的制约关系，通过一定中介环节而相互影响。技术与技术部门之间，技术与社会之间，人类活动系统与自

然系统之间,系统结构的变化都存在相关性,就是在没有人参与的自然系统之间,也不例外。这个过程,其实正体现了系统与环境的适应关系以及系统自身的自组织能力。

第五章 系统的进化

各种各样的系统,可以静态地研究,也可以动态地研究,而对各种系统的动态研究必然会引出系统进化的概念。^①这里所说的系统进化是指系统自身或一般系统的产生、变化和发展过程。由此提出的系统进化论研究适用于各种具体系统的一般进化原理。

第一节 进化论的进化

一、进化论由猜想到科学的发展

在进化问题上,人们首先关心的不是现存事物将进化成什么的问题,而是现存事物是由什么进化而成的问题;不是现存事物如何进化的问题,而是现存事物是如何进化而成的问题。

古希腊和罗马时代的许多哲学家(通常同时又是科学家)以

① 我们需要从广义上理解“进化”一词。如赫胥黎所说:“现在一般应用于宇宙过程的‘进化’一词,有它独特的历史,并被用来表示不同的意义。就其通俗的意义来说,它表示前进的发展,即从一种比较单一的情况逐渐演化到一种比较复杂的情况;但其含义已被扩大到包括倒退蜕变的现象,即从一种复杂的情况进展到一种比较单一的情况的现象。”(引自赫胥黎:《进化论与伦理学》,科学出版社 1971 年版,第 4 页。)

探索世界本源的方式对于世界的进化问题发表过各种至今令人惊叹的见解。他们无疑是系统进化论的伟大先驱。

在经历了漫长的中世纪后,十六、七世纪的科学革命以血和生命为代价使科学摆脱了神学的枷锁。科学家不再以对创世说的无聊注释来掩饰内心的不安,他们的目光朝向自然界,他们的兴趣转向实验,从此科学便大踏步地前进了。哥白尼的日心说,刻卜勒的行星运动规律,牛顿的力学体系,林奈的分类学相继建立起来了。可是,不幸的是,但又难免的是,每一条新发现的自然规律都被视为绝对真理,并与绝对不变的自然界相对应。于是,“自然界的任何变化、任何发展都被否定了。开始时那样革命的自然科学,突然站在一个彻头彻尾保守的自然界面前”^①。在这个自然界中,今天的一切、过去的一切和未来的一切都是绝对等同的。

但是现实的自然界与其说是存在着,不如说是生成着和变化着。科学的任务与其说是发现自然界的不变的秩序,不如说是探索不断变化的秩序。人类已经以某种令人满意的形式解释了不变的自然秩序,那么永恒的求知欲必然将人类引向自然秩序的变化。但是科学不能指望于上帝的手指,自然之谜必须以自然本身来解开。首先,康德以星云假说宣布了太阳系的生成,而以潮汐理论预言了太阳系的灭亡。其次,当原来深信摩西创世神话即“现有的物种都是全能的上帝原来所创造的物种”的林奈也不得不承认由杂交可能产生新物种的时候,拉马克从生物与环境的相互作用中说明了物种的多样性和生物从低级到高级

^① 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社1971年版,第10页。

的进化。还有,赖尔“第一次把理性带进地质学中”,“他以地球的缓慢的变化这样一种渐进作用,代替了由于造物主的一时兴发所引起的突然革命”。^①

进化论思想已经出现在宇宙学、地质学和生物学领域,永恒不变的自然界开始动摇了,而万古长存的自然秩序也开始瓦解了。但是康德、拉马克和赖尔的进化论一方面由于当时还缺乏必要的材料而臆测胜过事实,另一方面由于当时人们还缺乏接受进化论的社会的和理论上的准备,未能为科学界广泛接受。康德的工作被埋没了整整九十年,拉马克的进化论常被作为众人取笑的对象。尽管如此,进化论的种子已经播下去了,沉默和压抑只是等待新生命破土而出的前奏和阵痛。

进化论作为一种科学理论,是十九世纪五十年代的产儿。在那富有创造性的光荣年代里,在科学的三个领域几乎同时产生了科学的进化论。那就是克劳修斯等人的热力学第二定律、达尔文的物种进化论和马克思的唯物史观。

第一,克劳修斯于1850年指出:热不能自动从低温物体流向高温物体,即热传导是不可逆的。当然,与此同一的观点已由汤姆逊于1848年提出。克劳修斯的伟大功绩在于他引入了一个与系统的具体要素性质无关的物理学状态函数熵。热力学第二定律就表示为在孤立系统中

$$dS \geq 0$$

其中 S 表示系统的熵。这也就是著名的熵增加原理。孤立系统的熵是单向地增加的,如果达到最大值,就意味着系统处于热平

^① 恩格斯,《自然辩证法》,人民出版社1971年版,第13页。

衡态。自然界的进化从此就可以用物理系统本身所固有的物理量的变化来说明了。

不过,如众所周知,克劳修斯的进化论实质上是退化论。在他看来,自然界将由低熵状态倒退到高熵状态,整个宇宙最终要处于热平衡状态即热寂状态。他把熵原理由孤立系统简单地外推到整个宇宙,这显然是错误的。不过,克劳修斯的错误与其说是在于他预言了世界的退化,不如说是他把世界的退化趋势绝对化了;他没有看到世界上不仅有退化,而且有前进。但是不管怎样,由于熵概念的引进,科学已经可以用系统的熵的变化来研究物理世界的进化和物理事件的方向性,时间已不再是单纯的参量,而成为物理学的事实了。

第二,达尔文于 1859 年发表的《物种起源》一书,以大量事实和天才的洞察力建立了科学的生物进化论。达尔文总结和概括当时的古生物学、比较解剖学、胚胎学、分类学和赖尔的地质渐变论以及他本人的实践经验所提供的大量事实,提出了他的进化论。他以变异、遗传和自然选择来解释生物的进化。生物普遍具有变异,而变异分为定向变异和不定变异,前者是不遗传的,后者是遗传的,遗传的变异可以作为选择的材料。所谓自然选择,是在错综复杂的生存斗争中,保存有利的个体差异和变异,淘汰有害的个体差异和变异的过程。没有变异就没有选择,而没有选择就没有进化。由于长期的自然选择,有利变异逐渐积累,微小变异发展成显著变异,终于形成了适应于一定生存条件的性状和新物种。这样,达尔文认为现存的一切生物包括人类在内都是由原始单细胞生物进化而来的。他第一次科学地构画了生物由简单到复杂、由低级到高级的进化图式。

第三,“正象达尔文发现有机界的发展规律一样,马克思发现了人类历史的发展规律”。^① 马克思所发现的社会发展规律第一次以完整的形式发表在 1859 年的《政治经济学批判》序言里。马克思从生产力和生产关系、经济基础和上层建筑的相互关系中考察社会的运动,进而指出:“物质生活的生产方式制约着整个社会生活、政治生活和精神生活的过程。不是人们的意识决定人们的存在,相反,是人们的社会存在决定人们的意识。社会的物质生产力发展到一定阶段,便同它们一直在其中活动的现存生产关系或财产关系(这只是生产关系的法律用语)发生矛盾。于是这些关系便由生产力的发展形式变成生产力的桎梏。那时社会革命的时代就到来了。随着经济基础的变更,全部庞大的上层建筑也或慢或快地发生变革。”^② “大体说来,亚细亚的、古代的、封建的和现代资产阶级的生产方式可以看做是社会经济形态演进的几个时代”^③,而资本主义社会将必然向共产主义社会过渡。

由于克劳修斯、达尔文和马克思的工作,进化论在物理学、生物学和社会学中已经确立为科学。人们日益清楚地认识到,每一门科学不仅要研究对象的存在的秩序,而且要研究对象的进化的规律,只有把对象的存在纳入到它的进化中去才能完整地真正地认识对象本身。近代科学中关于世界一成不变的信条终于被彻底粉碎了,但不是在哲学的思辨中,而是在科学的事实中。

① 《马克思恩格斯选集》第 3 卷,人民出版社 1966 年版,第 123 页。

② 《马克思恩格斯选集》第 2 卷,人民出版社 1966 年版,第 194 页。

③ 《马克思恩格斯选集》第 2 卷,人民出版社 1966 年版,第 195 页。

二、进化论在本世纪的新发展

这里,我们的讨论将主要限于物理学和生物学领域。

先看物理学领域。

克劳修斯认为世界最终要达到热寂状态,但本世纪的宇宙学主流派所提供的是与此相反的世界。伽莫夫等人于四十年代末提出的原始火球爆炸模型认为,宇宙开始于高温高密度的原始火球的一次大爆炸。初期整个宇宙处于热平衡,由于高温只能存在一些基本粒子。随着宇宙不断膨胀,辐射温度及物质密度逐渐降低。当温度降至100亿度左右时,中子或者衰变,或者与质子结合成重氢、氦等元素。当温度降至100万度后,新的元素不再形成,等离子体中的物质与辐射处于平衡。当温度降至4000度左右时,等离子体复合成通常的气体,质子、中子、电子结合成各种原子。从此热辐射可以摆脱物质的吸引而在空间中自由传播。辐射温度继续降低,气态物质逐渐凝缩成星系或星系团,最后形成恒星及目前的宇宙。

据此,韦斯科夫认为,自然界有一种从无序到有序和组织的明显趋势,从大爆炸到目前的宇宙有一系列从简单到复杂的发展阶段。宇宙将比现在更加有序,因为一切无规的热运动都将冻结。但一切东西都将是冷的、死的和不变的。^①

显然,韦斯科夫的世界与克劳修斯的世界正相反。后者认为一切运动都将转化为热,宇宙将处于绝对的无序;而前者认为一切热运动都将冻结,宇宙将处于绝对的有序。但是他们都

^① 韦斯科夫:《科学的前沿和限度》,见《世界科学译刊》,1978年第1期。

认为宇宙将处于死寂状态。那么一个死寂的宇宙将怎样才能重新活动起来呢？恐怕只得再次求助于上帝的手指。

真理或许在两个极端之间。普利高津的耗散结构理论或许是解开宇宙进化之谜的一个途径。

耗散结构理论是普利高津于 1969 年首次明确提出的。它是热力学和统计力学发展的一个新成果。十九世纪人们的兴趣集中于平衡态与可逆过程，进入二十世纪人们开始重视非平衡态与不可逆过程。

一个系统的存在必须以它的有序性与稳定性来表征。普利高津首先以开放系统概念说明了负熵流可以使系统的熵减少，增加系统有序性。这是因为在时间间隔 dt 内，系统熵 S 的变化为、

$$dS = d_e S + d_i S,$$

其中 $d_e S$ 为熵流， $d_i S$ 为熵产生；在孤立系统中， $d_e S = 0$ ，故 $dS = d_i S \geq 0$ ；在开放系统中， $d_e S \neq 0$ ，若 $d_e S < 0$ ，且 $|d_e S| > d_i S$ ，则 $dS < 0$ 。

普利高津进一步以李雅普诺夫稳定性理论^①研究系统的稳定性。他认为，李雅普诺夫函数在平衡态中是熵；在线性非平衡

① 李雅普诺夫稳定性理论研究系统初始条件的变化对系统状态的影响。一个系统是在李雅普诺夫意义下稳定的，当且仅当初始值的小变化引起系统状态的小变化；如果初始值的小变化引起系统状态的大变化，就称该系统是在李雅普诺夫意义下不稳定的；如果一个在李雅普诺夫意义下稳定的系统，当 $t \rightarrow \infty$ 时，其状态渐近地回复到初始状态，则称该系统是在李雅普诺夫意义下渐近稳定的。这里所说的李雅普诺夫稳定性理论的主要思想是，不去求解系统的状态方程，仅借助于一个具有特定性质的函数（称为李雅普诺夫函数） v 及其全导数 dv/dt 的性质来判断系统的稳定性。这种方法又称为直接方法或第二方法。

态中是熵产生，可由 $P \geq 0$ 及 $\frac{dP}{dt} \leq 0$ 的性质来判断系统稳定性；而在非线性非平衡态中是熵的二次微商 $\delta^2 S$ ，它具有 $\delta^2 \leq 0$ 及 $\left[\frac{d}{dt} \delta^2 S \right]$ 不定号的特性。这样，稳定有序结构在一定条件下可以从非线性非平衡态中产生。从而可知，一个开放系统可能有三种不同状态，其一是平衡态，又分为稳定有序的和稳定无序的状态；其二是近平衡态，其中不能产生有别于平衡态的新结构；其三是远离平衡态，可以产生稳定有序的动态结构，即所谓耗散结构。

根据耗散结构理论，普利高津认为必须从抽象的普适的时空概念走向具体的有物理内容的时空概念。在他看来，有与经典力学或量子力学联系在一起的时间，有通过李雅普诺夫函数与不可逆过程相联系的时间，特别是有通过分歧理论与“历史”联系在一起的时间。一个稳定有序结构是不是耗散结构，需要考察它的历史。

这样，耗散结构理论指出了由无序走向有序的一个新途径，从而拒绝了宇宙死寂说（无论是克劳修斯的还是韦斯科夫的）。在普利高津看来，宇宙是一个开放系统，而不是孤立系统。它不会变得日益简单，日益无序，最后达到平衡。宇宙的发展不是单向性的，它可能变得日益复杂，日益丰富多采，形成各种新的有序结构。宇宙的历史不会结束，总有新变化、新发展，是无止境的。“无论我们向哪里看去，我们发现的不是稳定性和协调性，而是导致多样性和不断增加着复杂性的进化过程。”^①

① 普利高津：《复杂性的进化和自然界的定律》，见湛垦华等《普利高津与耗散结构理论》，陕西科技出版社 1982 年版，第 142 页。

再看生物学领域。

达尔文进化论的困难在于遗传与变异机制问题。本世纪生物学最辉煌的成就是遗传学，而遗传学的发展为达尔文进化论的发展作出了最重要的贡献。德弗里斯等于1900年重新发现孟德尔定律。摩尔根等发现伴性遗传规律，又发现连锁、交换和基因在染色体上的直线排列等现象，从而创立了基因学说。接着哈代和魏伯把孟德尔的分离定律应用到群体中去，用数学方法研究群体基因型的分布状况，建立了群体遗传学。到了三、四十年代，杜布赞斯基、J·赫胥黎等把基因学说和自然选择学说结合起来建立了现代达尔文主义进化论。五十年代以来，随着分子遗传学的发展，弄清了基因是具有特定核苷酸序列的DNA片段，而遗传密码的发现从根本上揭开了遗传与变异之谜。这又使现代达尔文主义进化论得到了进一步发展。

现代达尔文主义进化论认为生物进化的基本因素是突变、自然选择和隔离。突变(包括基因突变和染色体畸变)是选择的基本材料。自然选择的作用象筛子，那些不适应的突变被淘汰，那些适应的突变得以保存。突变是随机的，但选择决定了进化的方向。在个别情况下，新生的突变体比原来的类型更能适应环境，或者由于环境的变化，那些原来不适应于生存的突变体现在反而变得更适应了。在不同选择压力下，由一个单一的同源群体中发展出不同基因型的生物体，生物体之间的差别逐渐扩大，在出现了隔离机制后，彼此间基因的交流被阻止，从而形成了种群的分化。本来属于同一种群的不同群体分化成不同种群，并由于生殖隔离而彼此分开了；这时，它们即使再生活在同一地区内，互相之间已无法交换基因，也就达到了进化上的物种

差别的水平。^①

在生命起源和生物进化问题上，另一个引人注目的理论是爱根于 1971 年起倡导的超循环理论。它为从分子水平上解释生命的起源和生物进化提供了新的理论模式。对此，我们将在本书第九章加以介绍。

根据以上的介绍并考虑进化论在社会科学和思维科学（亦称认知科学）中的发展，我们可以把各种具体系统的进化论大致分为如下几种：

（1）物理进化论，即关于物理世界的进化理论，其研究对象是整个宇宙、银河系、太阳系和地球的进化，以及由无机物到核酸、蛋白质的进化。

（2）生物进化论，即关于生物世界的进化理论，其研究对象从宏观上看是由最简单的生命现象到人类的进化，从微观上看是生物体内的核酸、蛋白质的进化。

（3）社会进化论，即关于人类社会的进化理论，其研究对象是从原始社会到未来共产主义社会的进化。

（4）认识进化论，即关于认识的发生及发展规律的理论，其研究对象是个人、群体以及整个人类的认识进化规律。

（5）特别值得补充的是关于上述几种进化等级的依次过渡的研究，亦即研究从核酸、蛋白质到生命的转化，从猿猴“社会”到人类社会的转化，从猿猴“意识”到人类意识的转化，等等。

从原则上讲，上述几种进化论之间的相互关系是，前者的原

① 在六十年代末，木村资生等人提出非达尔文主义进化论即所谓中性突变说，为从分子水平上解释生物进化作了一种新尝试。这也是一个值得注意的倾向。

理适用于后者,但是后者具有与前者不同的一些特殊原理;当研究后者时寻求在其中起作用的前者的原理是必要的,但是无论如何也不能把后者归结于前者,以前者来代替后者。

三、进化论发展的新阶段——系统进化论

科学在它的发展进程中产生了与宇宙进化的不同等级相对应的具体系统的进化论。现在科学的步伐已踏进进化论发展的新阶段,那就是把上述各种具体科学的进化论综合成为系统进化论,从上述各种具体科学的进化论中抽象出能适用于各种不同系统的统一的进化原理。

系统进化论研究开始于贝塔朗菲,并已经和正在由普利高津和哈肯等科学家深入发展,尽管他们都未曾使用系统进化论这一名称。普利高津以将耗散结构理论从热力学领域推广到生物学和社会文化领域的形式研究了系统进化。贝塔朗菲和哈肯则直接从系统概念和各种不同系统的同型性出发研究了系统进化的某些原理。

贝塔朗菲在一般系统论中认为无机界和有机界的进化机制是不同的。在物理世界中,基本单元的集合体构成系统,低级系统的复合体构成高级系统,如原子结合成分子,分子又结合成各种物体。高级系统不是从低级系统自身中生长出来,而是在各低级系统的结合中建立起来。但是在有机界中存在着完全不同的系统进化规律。这里,高级系统不是从各低级系统的结合中建立起来,而是从低级系统自身中生长出来。机体系统的进化原理可表述如下:先是原始系统发生渐进分化,而渐进分化伴随着渐进集中化;渐进分化意味着渐进机械化,而渐进集中化也

就是渐进个体化,每一个体则是集中化的系统;渐进集中化过程产生出主导部分,它保证每一个体的整体可调节性,而系统等级由主导部分体现出来。这一原理在胚胎发育、生物进化、社会进化、心理进化等现象中普遍适用。

显然,在贝塔朗菲看来,在有机界中系统进化是通过渐进分化和渐进集中化的相互协调而进行的。这一思想十分重要,但总的说来,贝塔朗菲的描述显得过于抽象,并保留着有机界和无

机界之间的鸿沟。

普利高津的耗散结构理论在某种意义上填平了这一鸿沟。他把耗散结构理论当作“生命的热力学”。他认为:一个远离平衡的开放系统,不管它是物理系统、化学系统,还是生物系统、社会文化系统,通过与环境交换物质和能量,在反常涨落的作用下可以形成稳定有序的动态结构。他把这种耗散结构的有序称为“来自涨落的有序”。在一种耗散结构建立后,涨落由系统自组织的契机转化为破坏既有有序结构的因素,但是从而它又可以(或可能)把业已变得不稳定的系统推向新的结构中去。这就是系统进化过程。

普利高津的一个基本信条是“非平衡是有序之源”。但是,有序结构也有可能在系统处于平衡的情况下产生,或者说在热力学平衡下也可能出现由无序到有序的转化。

这一次,是哈肯用协同学打破了平衡与非平衡之间的隔墙。哈肯认为:一个开放系统既可以处于平衡态,也可以处于非平衡态。一个处于平衡的开放系统,或一个处于非平衡的开放系统,在一定条件下都可以呈现出有序结构。例如,超导体和铁磁体是一种有序结构,就连液体和固体结构也在一定程度上是有序

的，而它们都可以在热平衡条件下从无序状态中产生。因此有序结构的产生并不是非远离平衡不可；自组织过程既可以发生在非平衡系统中，也可以发生在平衡态系统中。因此，平衡相变和非平衡相变之间有着深刻的类似性。原来专用于热平衡态的一些方法，也可以用于非平衡态，如原来专用于一维超导体的一些方法也可用于激光。

在自组织过程中，能量以完全无规的形式输运给系统，但在这些能量的作用下系统可以形成有规则的宏观结构，而宏观结构的规则性基于大量要素的有序排列。为解释大量要素赖以形成有序结构的协同作用，哈肯采用序参量概念。序参量表征系统的宏观模式，决定系统的类型和有序度。系统的整体行为是由一个或几个序参量的行为来决定的，从而甚至很复杂的系统也可以在一定条件下表现出有规则的行为。

哈肯进一步指出：各种完全不同的系统由于参量的变化而发生不稳定，从而经过不稳定点时显示出深刻的相似。这种不稳定性最终产生新的宏观时空花纹。在很多情况下，系统进化的过程表述如下：接近不稳定点，我们可以区别稳定的和不稳定的集体模，稳定模被不稳定模役使并可以被消去。剩下的不稳定模就成为决定系统宏观行为的序参量。所得出的序参量方程可按一般性质分成几类，其中有些方程相当于那些制约着热平衡物理系统的一级相变和二级相变的方程，但也出现诸如描述脉冲或振荡的新类型。随机力和确定力（偶然性和必然性）之间的相互作用驱使系统从旧态进入到新位形，并决定哪个新位形得到实现。

这些研究足以说明我们有希望建立一种适用于各种不同类

型系统的统一的系统进化论。现在，关于系统进化的研究已包括了从无序到有序，从一种有序到另一种有序，从有序到混沌的进化过程。

第二节 系统进化的描述

一、典型现象

当我们所研究的是由大量要素(或子系统)组成的系统的时候，我们无论在自然科学、社会科学、思维科学或工程技术领域都可以发现这些系统在从无序到有序、从一种有序到另一种有序、从有序到混沌的转变过程中，在宏观尺度上显示出惊人的类似性。不管其要素是光子、原子、分子、细胞、神经原、器官、动物或人，在一定条件下这些要素之间的合作可以产生空间模式、时间模式或功能模式。

当一个系统从一种模式转变为另一种模式时，后一种模式的形成以前一种模式的不稳定为前提。在系统进化研究中，我们把这种形成某种模式的现象统称为不稳定性，并基于不稳定性概念来揭示不同类型系统的宏观转变的一般原理。

下面，我们简要地介绍在系统进化研究中目前常见的几种典型的不稳定性现象。

1. 贝纳德不稳定性

所谓贝纳德不稳定性也就是指形成贝纳德花纹(模式)的现象。

例如，在不变的重力场中，从下面加热某一流体薄层。当流

体的下界面为金属平板，上界面为自由面（即流体的上表面上没有覆盖任何平板）时，在一定条件下就能观察到流体的对流花纹呈六角形格子，以及流体从一种模式向另一种模式的转变。具体解释如下。如果下界面的温度保持 T_1 ，上界面的温度保持 T_2 ，则上下界面的温度梯度 $\Delta T = T_1 - T_2$ ，

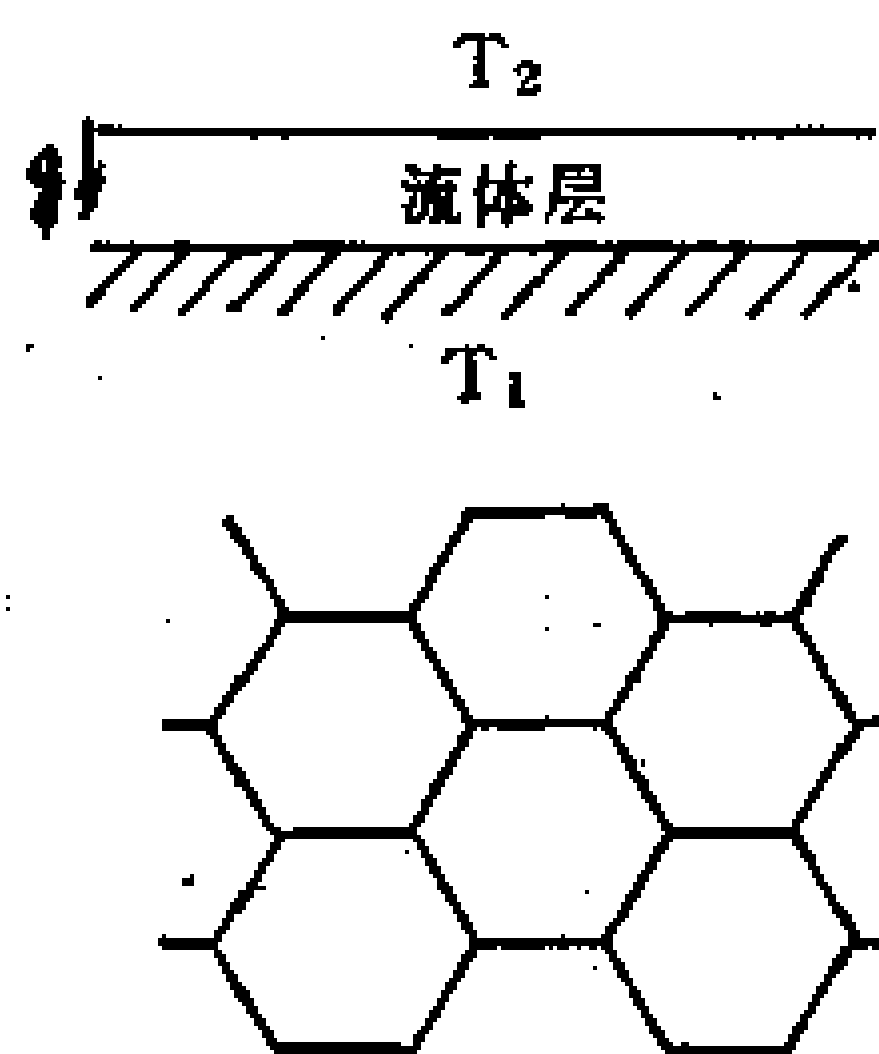


图 5.1 贝纳德花纹

> 0 （见图 5.1）。液体不断从下表面吸收热量，又不断从上表面放出热量，这是一个开放系统。

当 ΔT 很小时，流体静止，热以传导方式输运，热流向上。

当 $\Delta T > \Delta T_c$ (ΔT_c 为一临界值) 时，俯视流体，出现大量六角形对流元胞，六角形中心流动向上，边缘流体向下，流线接近三角形。

当 $\Delta T > \Delta T_c'$ ($\Delta T_c'$ 为另一临界值) 时，出现周期振荡，并过渡到湍流^①。

2. 激光

激光器是一种能够发射相干光的光源，但激光作用在星际空间中也自然发生。典型的激光器是一根晶体棒或装有气体的

① 湍流亦称紊流，原为流体力学的概念，指流体质点相互混杂，迹线极不规则的流动状态。它现在正在同“混沌”一起被推广成为跨越许多学科领域的普遍概念。就“湍流”和“混沌”的区别而言，“混沌”首先是指时间进化中的随机行为，而“湍流”必须涉及空间分布上的随机性。但目前往往对“湍流”和“混沌”不作严格区别。

玻璃管。这些激光器利用受激辐射原理使光在这些激发的工作物质中放大或发射(振荡)。当工作物质中的原子受到外界激发或泵浦时,激光器便发射出光波。泵浦功率不同,光波的宏观模式也就不同,即场强 $E(t)$ 的振荡模式就不同。

当泵浦功率较低时,激光器象普通的灯,发出不相干的光波。如果我们能听到光,这时所听到的是噪声。这时场强随时间的变化如图 5.2 (1) 所示。

当泵浦功率增大到一个临界值时,激光器的噪声被单色光取代,这意味着各原子发出纯粹正弦光波,而这反过来又意味着各个原子以完全关联的方式活动(见图 5.2 (2))。

当泵浦功率增加到第二个临界值时,激光器周期地发出很强的短脉冲,如图 5.2 (3) 所示。

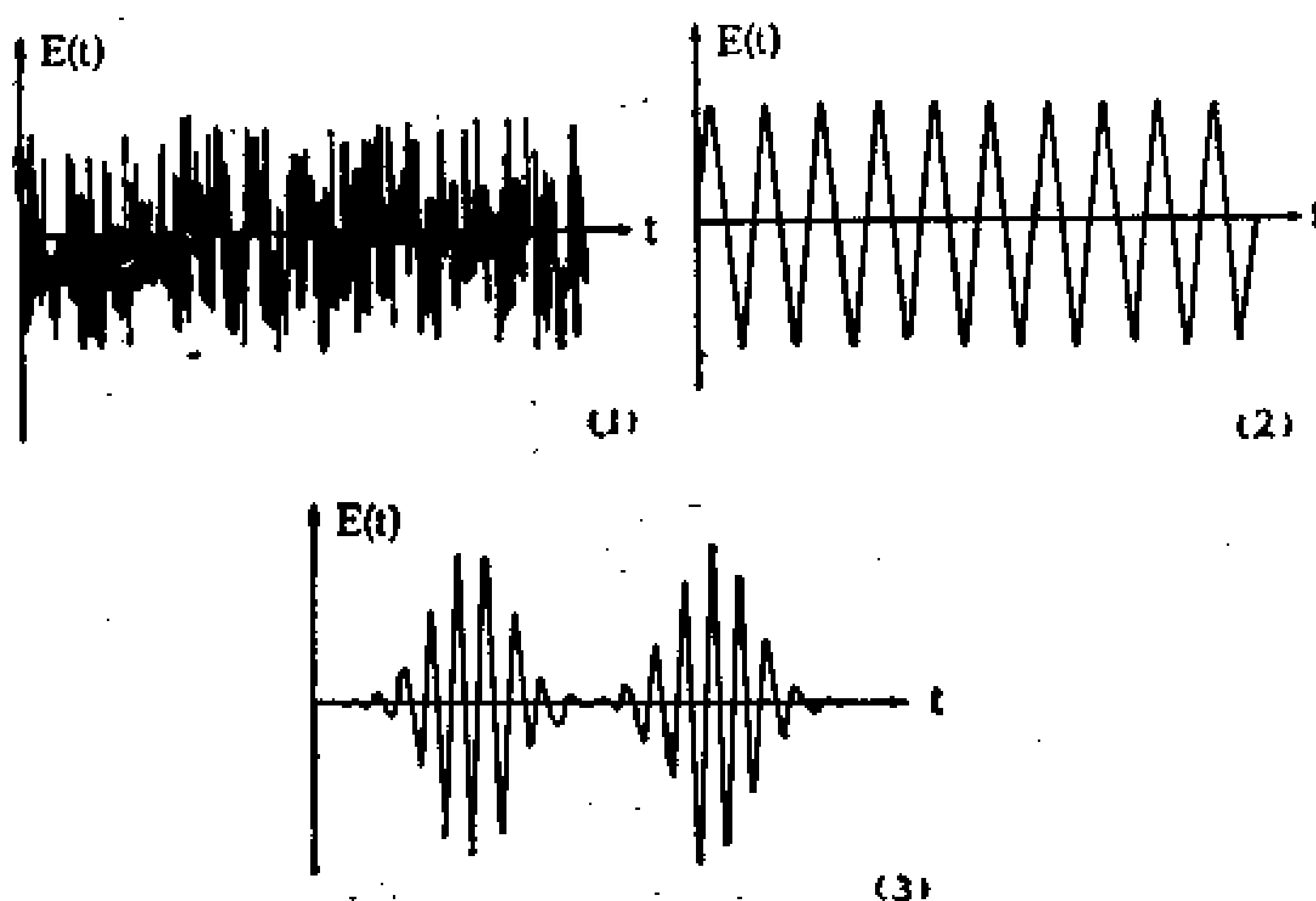


图 5.2 激光器场强 $E(t)$ 作为时间 t 的函数

这样,我们有下列不稳定性序列:

$$\text{噪声} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{相关振荡,} \\ \text{频率为 } \omega_1 \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{周期脉冲,} \\ \text{频率为 } \omega_2 \end{array} \right\}$$

即

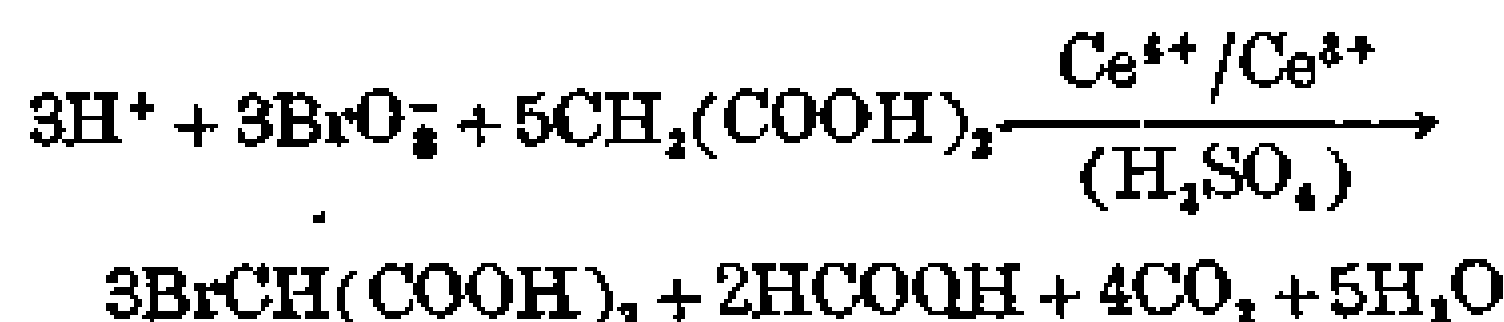
非周期振荡 $\rightarrow$ 一种频率 $\rightarrow$ 二种频率。

在不同条件下,光辐射还会变为完全不规则的“混沌”或“湍流”,频谱也变成宽带。

3. 贝洛索夫-扎包廷斯基反应

化学振荡现象也相当引人注目。其中我们可以看到时间模式、空间模式或时间-空间模式的自发形成。

例如,将 $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$, KBrO_3 , $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$, H_2SO_4 和几滴指示剂相混合搅拌后倒入试管中。这时在试管中进行的就是著名的贝洛索夫-扎包廷斯基反应。丙二酸在催化剂 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 的参加下被溴酸所氧化:



驱使这个反应进行的能量来自丙二酸与由它分解而产生的最终产物即二氧化碳和蚁酸的化学能之差。重要的是,在反应过程中由于中间产物 HBrO_2 作为自催化剂促进反应的进行,而另一中间产物 Br^- 作为控制因素抑制过份的自催化作用,结果 Ce^{3+} 与 Ce^{4+} 的量就发生周期振荡。

在实验中我们所观察到的实际情形是,在把反应液倒入试管的一开始,整个液体显示出红 $\rightleftharpoons$ 蓝振荡(红色表示 Ce^{3+} 过多,蓝色表示 Ce^{4+} 过多),但经过一段时间后就形成红蓝交错的同心圆或涡状的彩色图样,而这个图样也处于不断的红 $\rightleftharpoons$ 蓝

振荡中。

如果系统是封闭的,由于反应物(上例中为丙二酸)被耗尽,振荡最终会消失;在开放系统中由于新的反应物不断补充,最终产物不断被取出,振荡就可以持续下去。

现在至少在 12 种系统中观察到了化学振荡现象。人们还知道,如果调节一个反应物的浓度,就可出现一个不同性质的行为序列,比如振荡和混沌行为之间的交替变化。有的反应还可以进入混沌状态。

4. 捕食者与被捕食者的关系

在同一生态环境中,如果不同物种以相同食物为生,各物种的前程将由达尔文的“生存斗争”的原理来决定。如果不同物种的食物互不相同,则它们有可能共存共荣。

人们在实际生活中观察到了物种数量的时间振荡,例如亚德里亚海里不同种鱼群的周期变化,或加拿大的野兔和山猫的数目在时间上的变化等。野兔以植物为生,而山猫以野兔为生。当山猫很多时,野兔被大量吃掉,于是山猫的食物减少,结果山猫的数目就减少。山猫数目的减少就容许野兔数目增加,这样一来山猫又有了较多的食物,于是山猫的数目又将回升。因此山猫和野兔的数目显示出有趣的周期变化,如图 5.3 所示。

除了以上几个较为熟悉的实例之外,我们还可以在其他学科领域发现系统宏观模式的产生和变化,例如在物理学中有等离子体的不稳定性、更氏振荡器和隧道二极管宏观模式转变;在工程领域有某些材料的后期压曲模式和颤动;计算机科学中有计算机的自组织、机器的模式识别;在经济学中有充分就业和非充分就业之间的转变;生物学上有生物体的形态发生与生物进

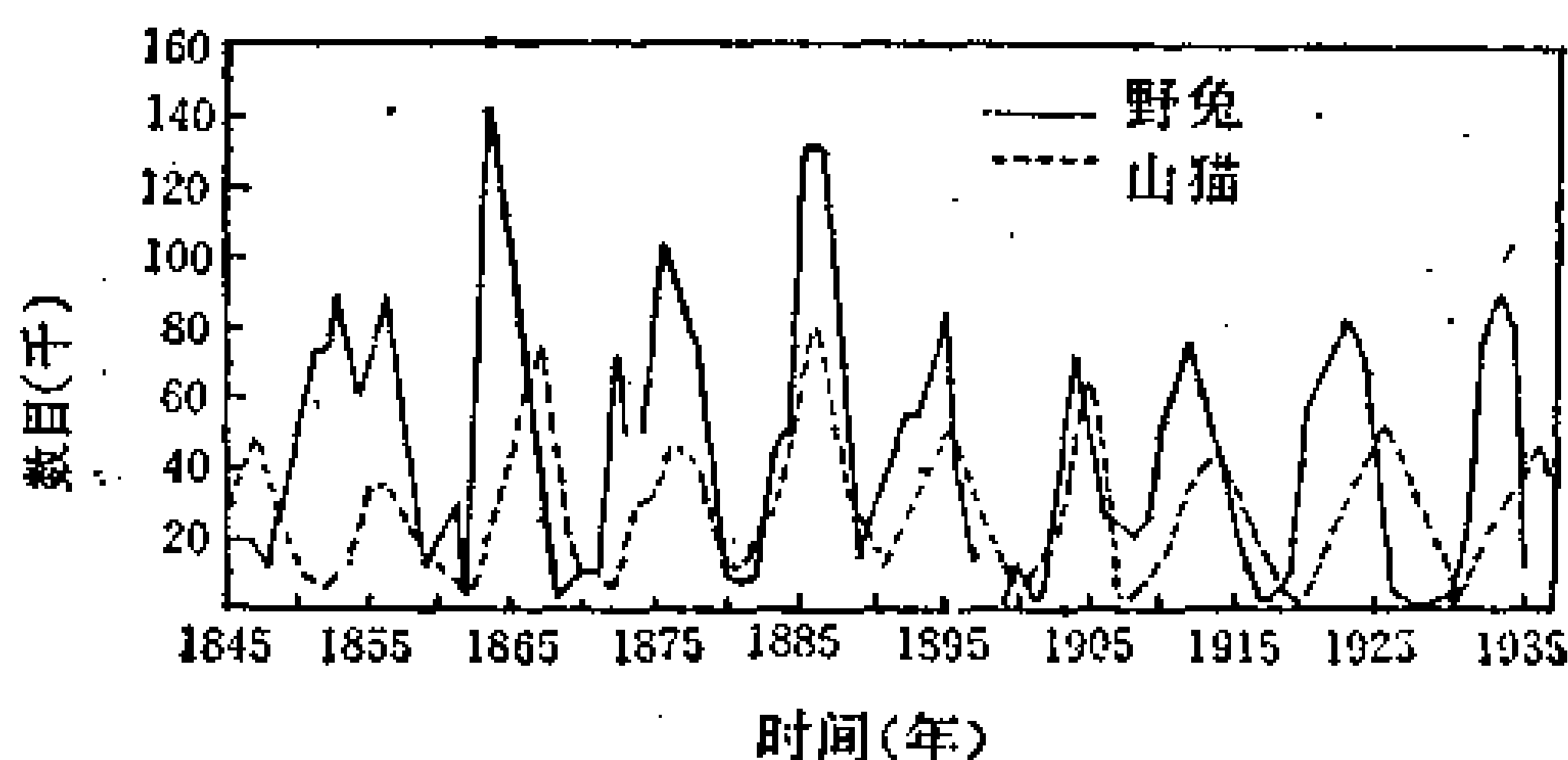


图 5.3 山猫和野兔数目的周期变化

化；社会学上有舆论形成的宏观模式；等等。在社会、文化或科学等系统中所发生的是较抽象的宏观模式，诸如思想、概念或范式。

在所有这些实例中，我们已经看到：这些由大量要素（或子系统）组成的系统在其某些条件（控制量）变化时，就可以发生无序-有序、有序-有序或有序-混沌的宏观转变，还可以显示出宏观模式的变化序列。

一个系统可以从均匀的、无序的、静止的状态进入不均匀的但很有序的状态，或者甚至进入几种可能有序状态中的一种，还可以进入无规则的运动状态即混沌状态。那些处于有序状态的系统可以处于不同的稳定状态，如单稳态、双稳态或多稳态。在有序稳态中，系统可以单频率或不同频率（准周期频率）发生各种振荡。再者，还会形成各种空间模式，如蜂巢形结构、波或螺旋线。这些结构可能以动态方式靠通过系统的不断的能流或物质流来维持，例如在流体力学中所看到的那样。在另一些情形下，结构先是以动态方式形成，但最终却发生“凝固”，结果以静态方式维持，例如在结晶或形态发生中所看到的那样。

在所有这些情况下，我们所研究的是系统从一状态到另一状态的宏观转变，或者说是从一种系统到另一种系统的进化过程，而这些转变都是能够在宏观尺度上导致新结构的各种质变过程。

二、状态描述

系统进化的一般理论是从各种具体系统进化的研究基础上概括出来的，而一般系统的进化终究是要用系统进化方程来表示。这就需要对系统进行数学描述。这里我们简要地说明常用的一些基本概念。

系统描述通常分为内部描述和外部描述。外部描述亦称输入-输出描述，通常用传递函数来表示系统的输入转换为其输出的机制。与此不同，内部描述亦称结构描述，是指用各状态变量及它们之间的相互关系，亦即用一组状态方程描述一个系统。

如已所述，系统进化主要表现为系统状态的进化。因此在系统进化的研究中必须采用内部描述方法。

1. 状态与状态空间

所谓状态，是表示系统所处状况的科学术语。任何系统的状态都可以用决定其行为的一组量来表示。例如，气体的热学状态是温度、压强和体积的综合表现，可以用这三个量来描述。能确定系统状态的最少一组变量就称为状态变量。例如，描述一个系统状态至少需要变量 $q_1, q_2, \dots, q_n$ ，则这一组变量就是该系统的状态变量。

在某一时刻 $t = t_0$ ，状态变量组的值 $q_1(t_0), q_2(t_0), \dots, q_n(t_0)$ 决定系统在该时刻的状态。如果以此作为初始状态，并给

出 $t \geq t_0$ 时的输入值,就能用状态变量组 $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ 来表示该系统在任一时刻 $t \geq t_0$ 的状态。

我们把用上述 n 个状态变量作为分量而构成的向量 $q(t)$ 称为系统的状态向量,可表示为

$$q(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{bmatrix} = [q_1, \dots, q_n]^T$$

进而,我们把状态向量的所有可能值的集合称为状态空间。在状态空间中,系统的每一状态都表示为一个点,其坐标为 $(q_1, q_2, \dots, q_n)$,这个点代表着系统的给定状态,称为代表点。

状态空间的维数等于确定系统状态的独立变量的数目。这些独立变量的数目通常叫作系统的自由度。例如,如果状态变量只有一个,则系统状态空间维数为 1,系统状态表示为直线上的一点。如果状态变量为两个,则状态空间维数为 2,系统状态表示为 $q_1 - q_2$ 平面上的一点,其坐标为两个状态变量的集合 (q_1, q_2) 。同样,在三维空间中,系统状态要用三个状态变量的集合 (q_1, q_2, q_3) 来表示。如果状态变量数目为 n 个,则其空间为 n 维空间,其坐标为 $(q_1, q_2, \dots, q_n)$ 。

在用状态空间法研究系统时,用描述状态变量之间关系的参量方程来表征系统,这种方程也叫作状态方程,一般是一阶微分方程组或差分方程组。

2. 相空间与相图

用状态空间研究系统行为的方法是一种很有效的研究方法。但是我们不可能在任意的一个状态空间里有效地研究一个动态系统的行为。如果状态空间的坐标是任意选取的,那么这

个系统的运动可能是不可预测的。这是因为在状态空间上由某一点表示的位置可对应着不同的代表点轨迹。

为此，相空间的引入就成为必要。相空间也是一种描述系统运动状态的空间。在相空间中系统的运动能表示为在奇点以外的地方互不相交的轨迹，使得在不变的外界作用下，系统的每个初始状态都唯一地确定系统的运动过程。

相空间的坐标叫作相坐标。相空间中的每个点都由其相坐标表示，称为代表点或相点。每个相点都代表着系统的一种运动状态，反之，系统的每种运动状态在相空间中都有一个相点。当系统从一种运动状态开始，经过一段时间后变为另一种状态时，这一变化在相空间中的表现为从一个相点移到另一个相点。相点在相空间中的连续移动可画出一条曲线，称为相迹或相轨道，它反映系统的运动规律。任何系统的相空间都完全为其相轨道所充满，即通过这个空间的每个点都有一条轨道。表现系统运动的相轨道族称为相图。在实际的相图中通常为简便起见只画出部分轨道族。

对一个自由度为 f 的要素，就需要用 $2f$ 维相空间来描述其运动状态。如果系统由 N 个自由度为 f 的要素组成，其总自由度为 Nf ，描述其运动状态的相空间必须是 $2fN$ 维。

不能把系统在相空间的运动轨道和它在真实空间的运动轨道混同起来。应记住相空间是一种抽象的概念空间，是为研究和计算方便而设计的一种数学空间。有了这种理解，才能真正理解相图的含义。

三、进化方程

所谓系统进化方程,必须能用来揭示在物理、化学、生物学、心理学、社会学、经济学和生态学以及其他各种学科领域中起作用的统一的进化原理。对各个别领域进化过程的研究表明,起决定性作用的是动力学。集体“模”的增长率或衰减率决定着所形成的是何种宏观状态以及怎样形成那种宏观状态。时间是用来说明进化的关键参数。因此我们将着重讨论各种系统在时间上的进化。

1. 进化方程的一般形式

各种具体系统如贝纳德花纹、激光、贝洛索夫-扎包廷斯基反应系统或捕食者-被捕食者系统都可以有其特殊的时间进化方程。但在这里我们所感兴趣的是普适的系统进化方程。系统进化方程的一般形式是非线性随机偏微分方程,可表示为

$$\dot{q} = N(\alpha, q, \nabla, x, t) + F(t) \quad (5.1)$$

显然,这个方程既包含有确定性的驱动力 N ,也包含有随机性的涨落力 $F(t)$ 。该方程是表示系统在驱动力 N 和涨落力 F 作用下进化的状态方程。方程中各符号的含义如下。

q 表示状态向量,它的各分量 $q_i, i=1, 2, \dots, n$ 为状态变量。一般来说, q 依赖于空间与时间,即

$$q(x, t) = (q_1(x, t), q_2(x, t), \dots, q_n(x, t))$$

x 表示空间向量,一般取

$$x = (x, y, z)$$

α 表示控制参量,有

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$$

∇ 表示微分算子

$$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$$

t 表示时间。

2. 进化方程的特征

式 5.1 所示的系统进化方程有下列几个一般特征。

(1) 多分量

作为一般情形，我们所研究的是由大量要素(或子系统)组成的系统。描述这样的系统，需要用多个状态变量。因此，进化方程中的状态向量一般由多个分量组成。

(2) 非线性

实际系统一般都含有各种非线性因素，因此系统进化方程是非线性的，而线性方程被视为其特殊情形或近似处理。例如，考虑浓度为 q_1 的化学物质，它通过与浓度为 q_2 的化学物质的相互作用，以自催化方式产生出来。 q_1 的增长率为

$$\dot{q}_1 = \beta q_1 q_2$$

显然，两个成分之间的合作是由非线性项表示的。一般情况下，进化方程 5.1 的右边是系统诸变量的一个非线性函数。

(3) 随机性

系统进化方程的一个更重要的特征是它含有随机性。系统的时间进化与不能绝对准确预测的原因有关。这些原因在方程 5.1 中表示为涨落力 $F(t)$ 。关于涨落或随机性的来源和描述有三种重要理论。

(i) 经典统计理论。这个理论认为，遵从牛顿力学定律的那些粒子只具有确定性，但由大量粒子组成的系统或对此种系统的描述就具有随机性。因此当我们从微观描述过渡到使用中

观或宏观变量的系统描述的时候，例如当我们不是用各个分子的位置而是用这些分子的局部密度和速度来描述液体的时候，就必须考虑随机性，考虑涨落。

(ii) 量子力学。海森伯的测不准原理指出，不可能同时绝对精确地测定一个微观粒子的位置和速度。而玻恩对波函数的统计解释表明，微观粒子的波乃是几率波。这样，在微观世界，由量子涨落表示的随机性是不可避免的。因此，对于微观事件的准确预测从原理上就成为不可能的，并且为达到宏观尺度而推广微观事件时必须考虑量子涨落。

(iii) 非平衡系统理论及其他。协同学、动力系统理论和其他一些非平衡系统理论的最新进展表明，即使在方程 5.1 中消去涨落力 $F(t)$ ，又不考虑量子涨落，也就是说使进化方程 5.1 成为完全确定性的，系统的未来发展还是会沿着相当不同的路径进行，最终会出现混沌现象。所谓混沌，被视为由确定性方程描述的系统中出现的无规则运动。因此在系统进化研究中，不仅要考虑外在随机性，更重要的是要考虑内在随机性。混沌就是系统的确定性和内在随机性交互作用的产物。

3. 进化方程的解

有了系统进化方程，就可以用该方程的解来讨论系统的进化，而进化方程的解 $q(t)$ 或 $q(x, t)$ 原则上都可以用图来表示。下面我们用相图从直观上来讨论系统进化方程的解。在这些图中相点的轨道就意味着系统进化的路线。

先讨论 q_i ，即 $q_1, q_2, \dots, q_n$ ，它们与空间坐标 x 无关，只与时间 t 有关。 $q_1(t), q_2(t)$ 等的时间进化示如图 5.4。这些图表示各变量的时间进化。

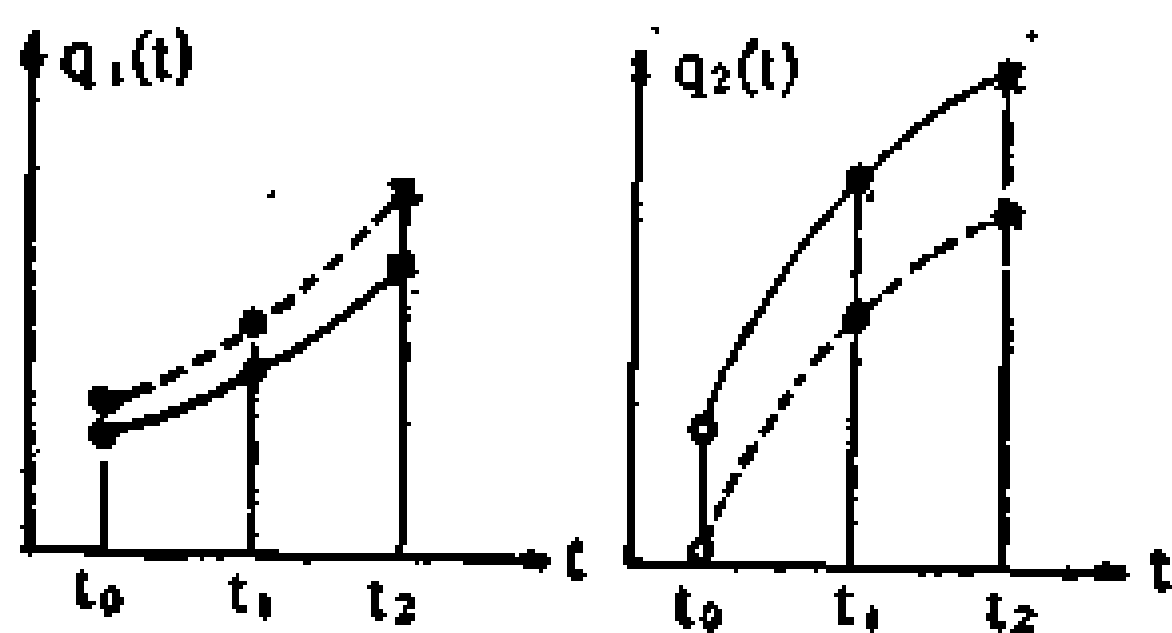


图 5.4 各变量的时间进化

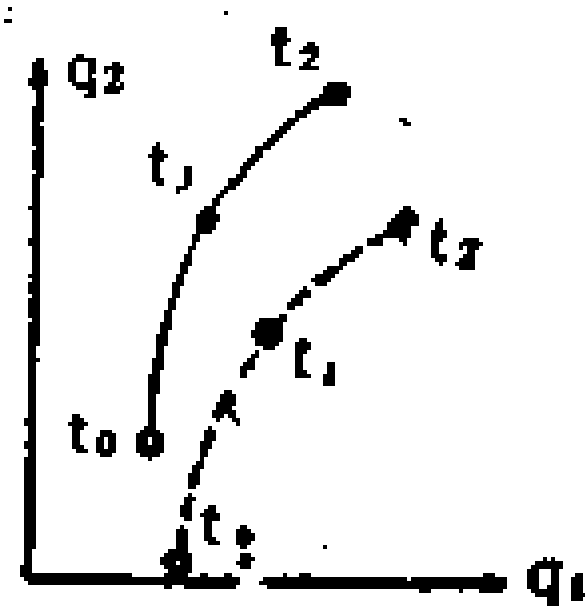


图 5.5 系统状态的时间进化

为表示系统的时间进化，取 $q_1, q_2, \dots, q_n$ 作为 n 维空间的坐标，再标上各时刻 $t_1, t_2, \dots$ ，则点 $(q_1(t), q_2(t), \dots)$ 就表示系统在进化过程中通过的各点，如图 5.5 所示。如在 $t \rightarrow +\infty$ 和 $t \rightarrow -\infty$ 中连续取点，就得到进化轨道，如图 5.6 所示。

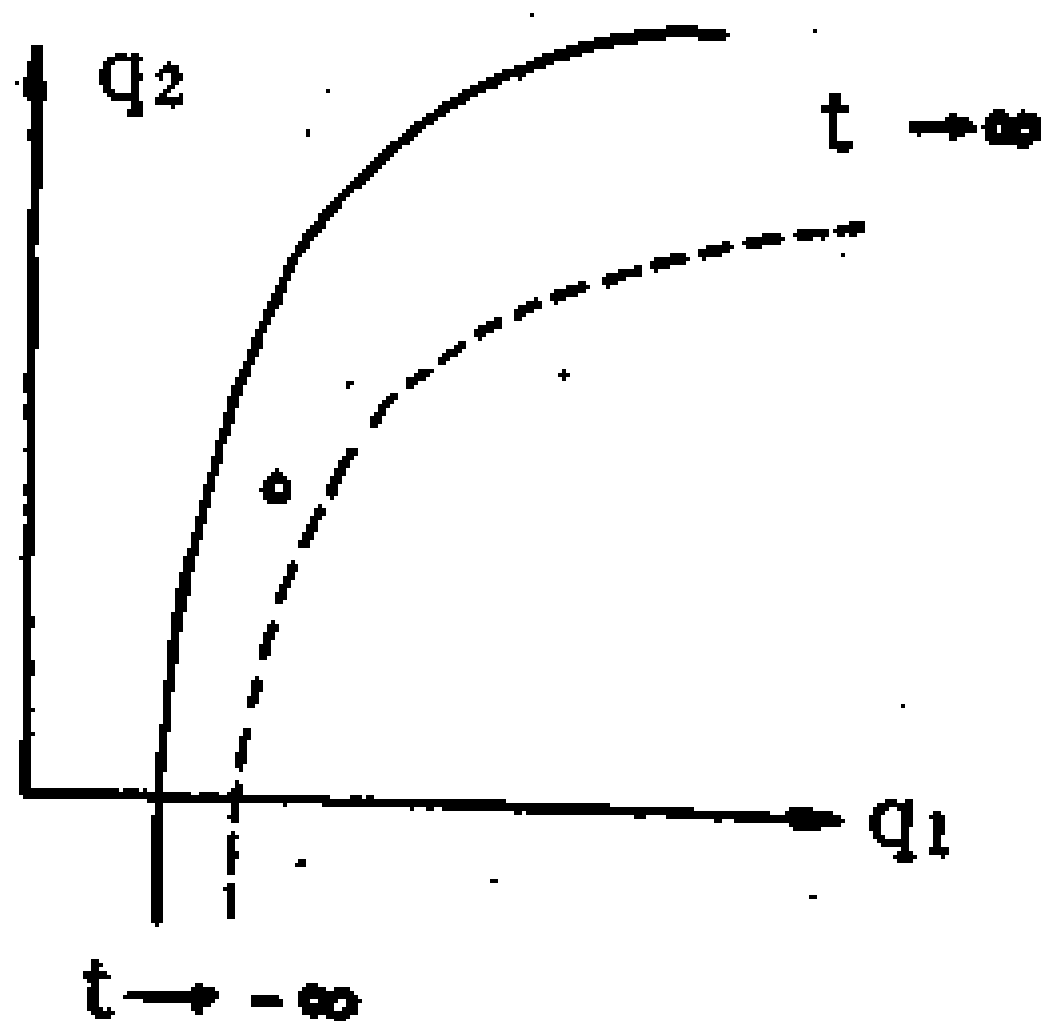


图 5.6 系统进化轨道

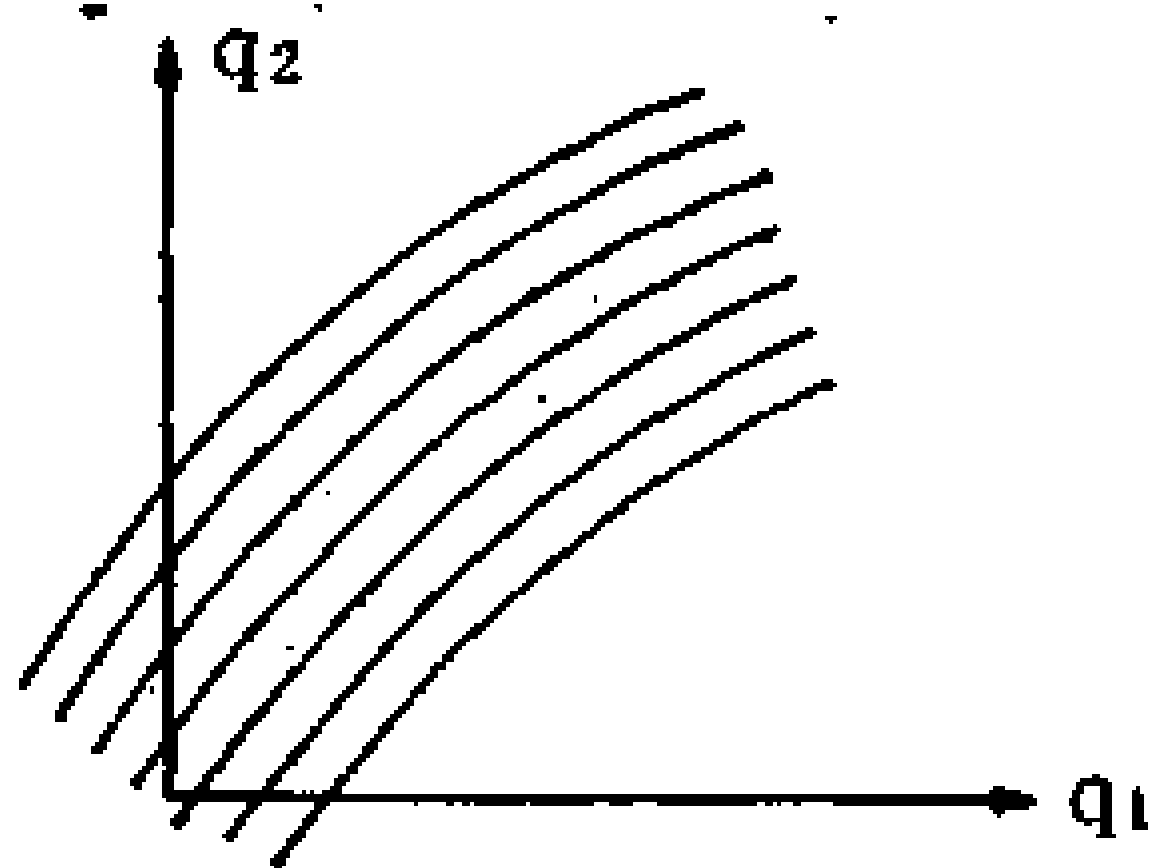


图 5.7 轨道集

如果画出一条轨道附近的其他轨道，就可得到轨道集（图 5.7）。因这些轨道很象流体的流线，我们就称之为“流线”，而称流线的总体为“流”。

此外，在图 5.4 至图 5.6 的几张图中，还可以看到：变量的

初值不同,所画出的轨道就不同,即图中的实线轨道和虚线轨道由不同的初始点出发。

这些轨道并非总是(在一维上)从 $q = -\infty$ 到 $q = +\infty$ 。它们可能以某种方式结尾。因为这些流线被“终点”所吸引,我们把这些“终点”称为吸引子。^①实际上,所谓吸引子是指在把相空间某一区域的点都取作初值时,其轨道在 $t \rightarrow \infty$ 下的极限集合。方程 5.1 所示的耗散系统的运动最终要趋向维数比原始相空间低的吸引子。

现已知道,有各种各样的吸引子。

(1) 不动点。

如果 $t \rightarrow \infty$ 时系统趋向一个与时间无关的定态,即相空间中一个特定的点,就称之为不动点。不动点是零维的吸引子。一维以上的系统原则上就可能(但不必定)具有不动点。例如在二维相空间中常见的不动点有结点、焦点、鞍点等。

结点是相平面内流线直接收敛且趋于它的点(稳定结点),或从它辐射出去的点(不稳定结点)。图 5.8 表示稳定结点,图中流线结尾于此点;如果时间反演,流线将背离此点。图 5.9 表示趋于结点的变量的时间变化是单阻尼的。

焦点是相平面内由螺旋流线收敛于它的点(稳定焦点),或从它发散的点(不稳定焦点)。图 5.10 表示稳定焦点,图中流线

① 钱学森曾经指出:“哈肯的贡献在于具体地解释上述相空间的‘目的点’或‘目的环’是怎样出现的。他的理论阐明,所谓目的,就是在给定的环境中,系统只有在目的点或目的环上才是稳定的,离开了就不稳定,系统自己要拖到点或环上才能罢休。这也就是系统的自组织。”(《论系统工程》,湖南科学技术出版社 1982 年版,第 245 页)这里所说的目的点或目的环即为不动点或极限环,皆属于本书所说的吸引子。

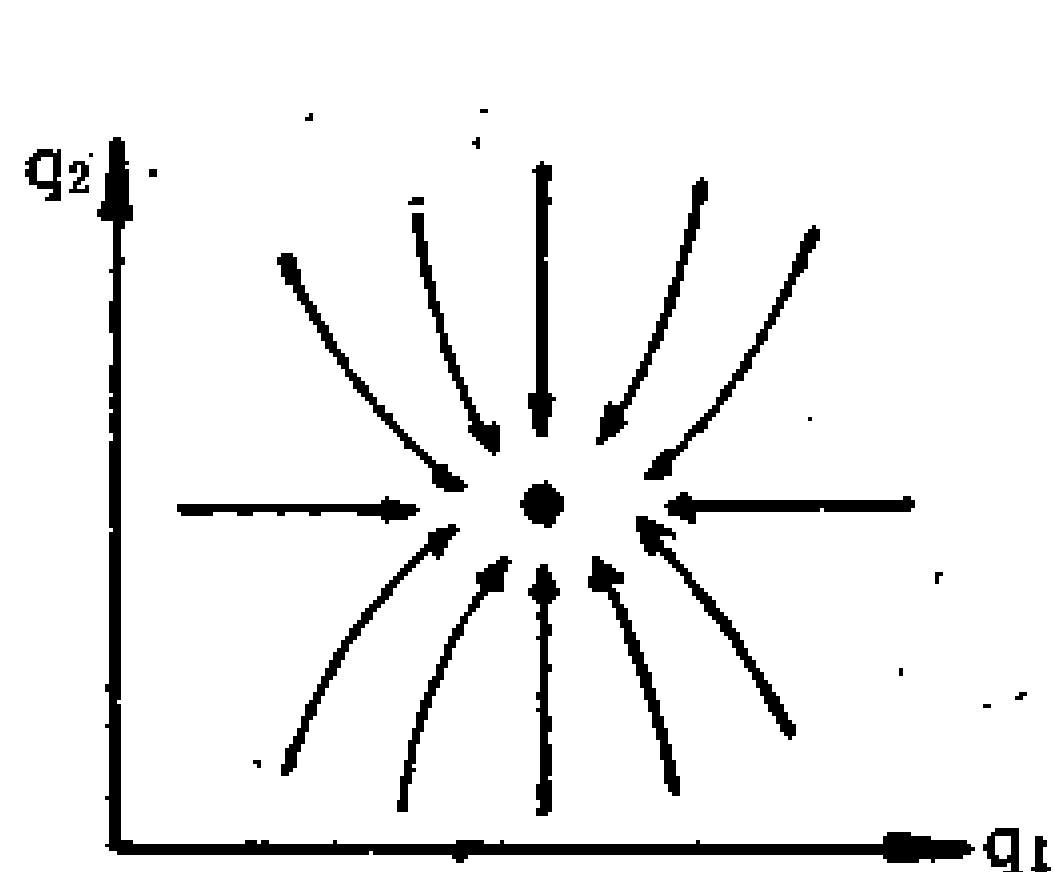


图 5.8 结点

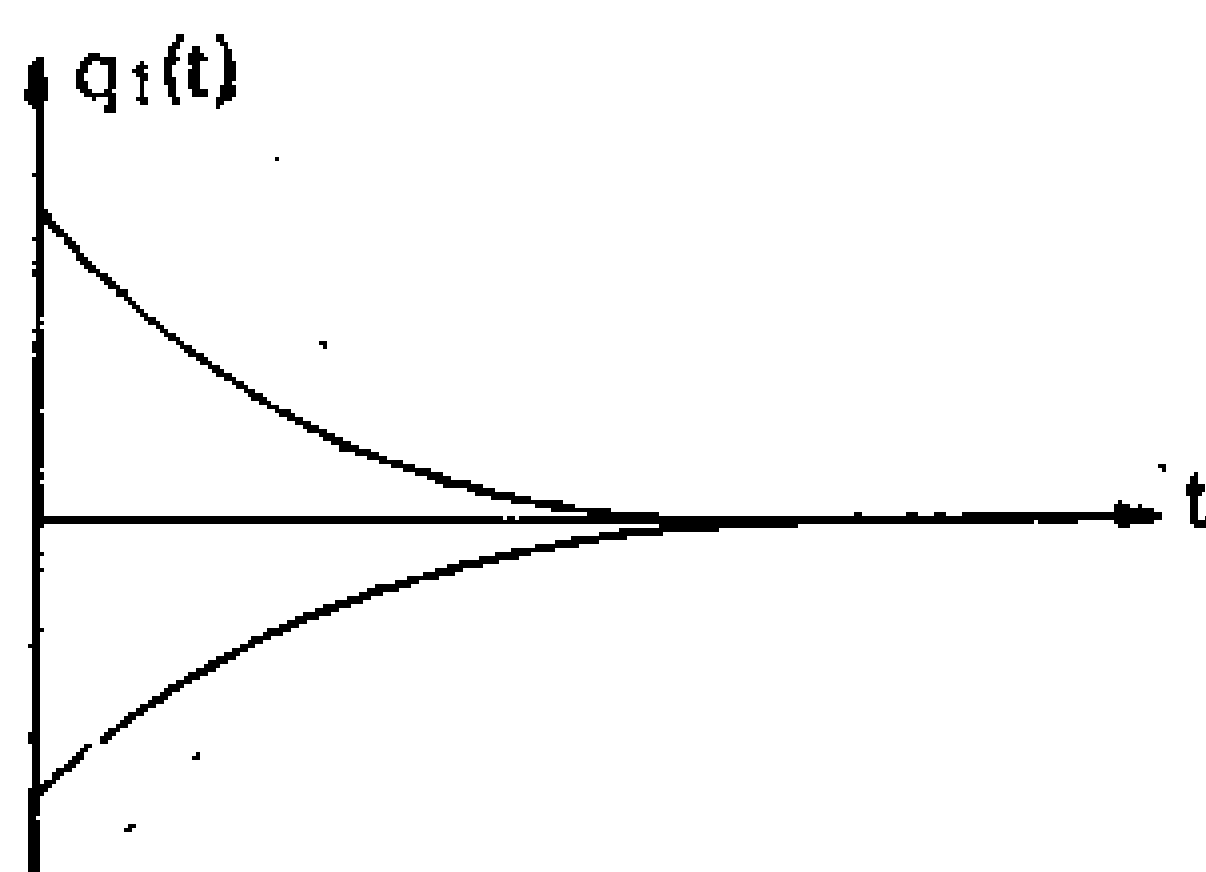


图 5.9 趋于结点的变量 $q_1(t)$

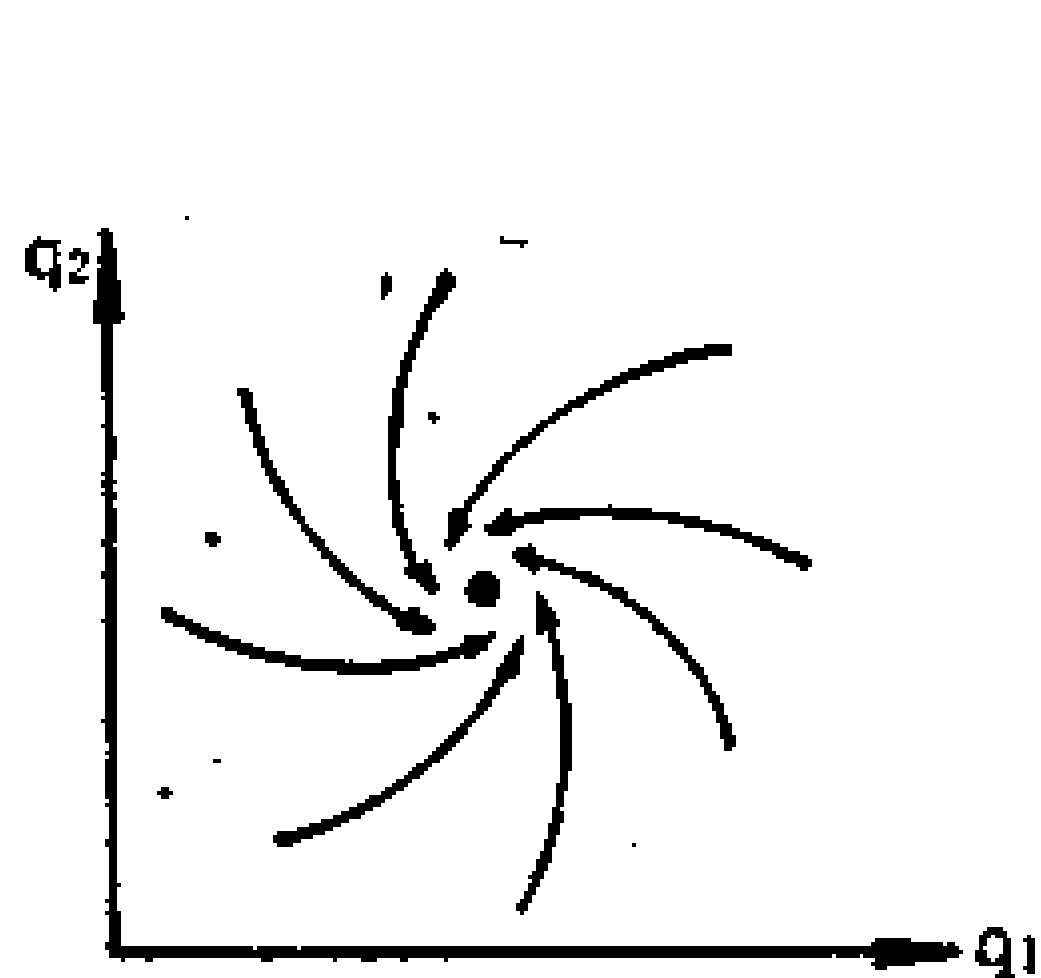


图 5.10 焦点

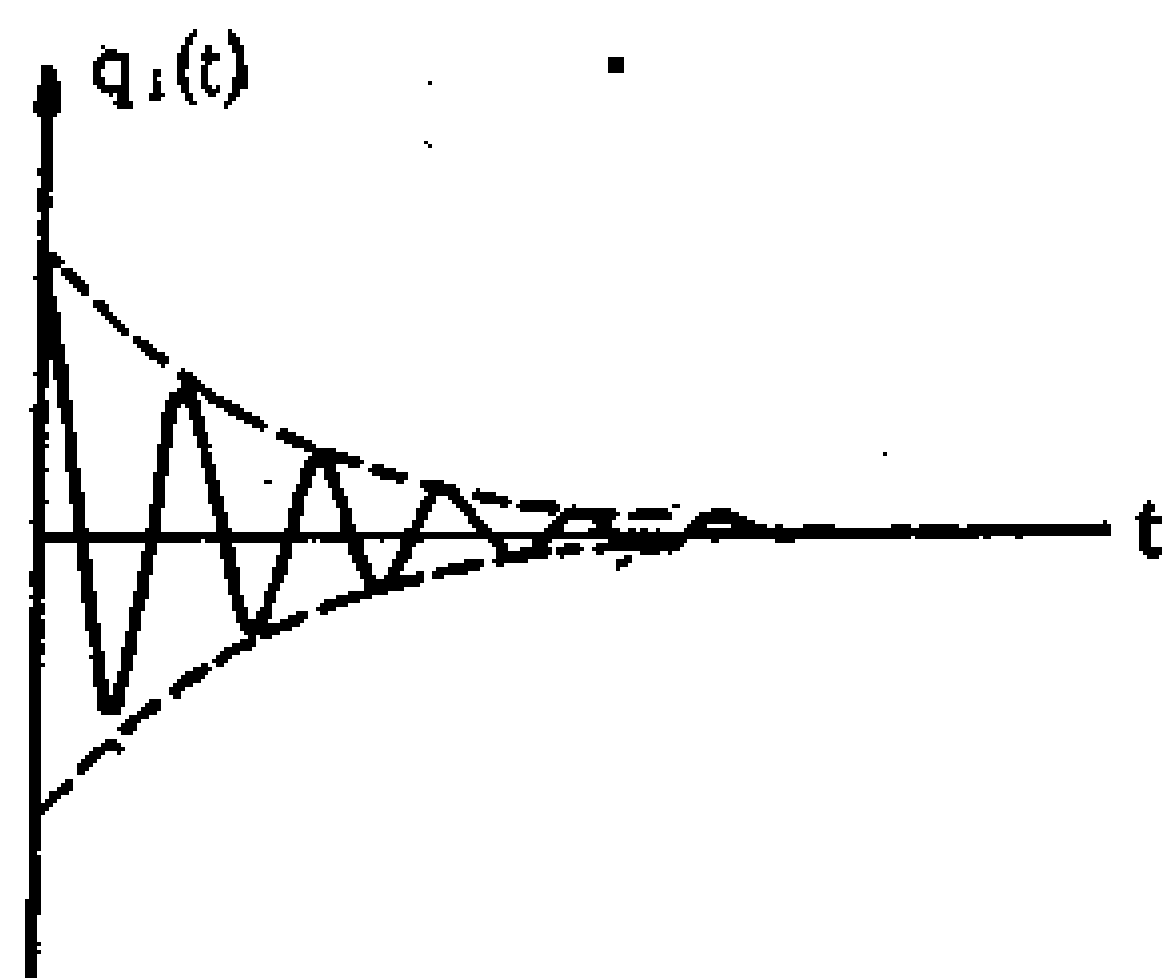


图 5.11 趋于焦点的变量 $q_1(t)$

结尾于此点;如果时间反演,流线将背离此点。图 5.11 表示趋于焦点的变量的时间变化是振荡且阻尼的。

(2) 极限环

如果 $t \rightarrow \infty$ 时系统中剩下一个周期振荡,这就是一维的吸引子即极限环。一维极限环在相平面图中是孤立的封闭轨道。图 5.12 表示相平面上的稳定极限环,诸轨道从极限环的外部 and 内部接近极限环。如果诸轨道离开极限环发散,则是不稳定的。图 5.13 表示沿该极限环运动的变量的时间变化是无阻尼振荡。

在二维以上空间中还可以出现其他形状的极限环。例如,

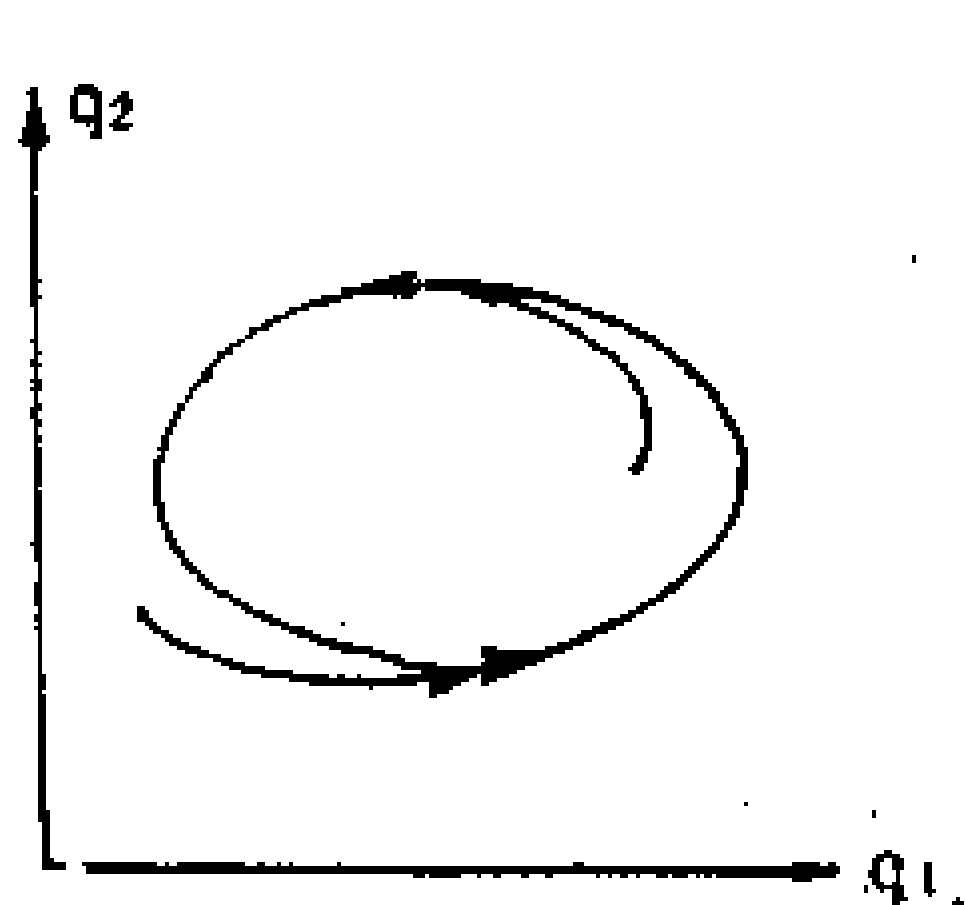


图 5.12 极限环

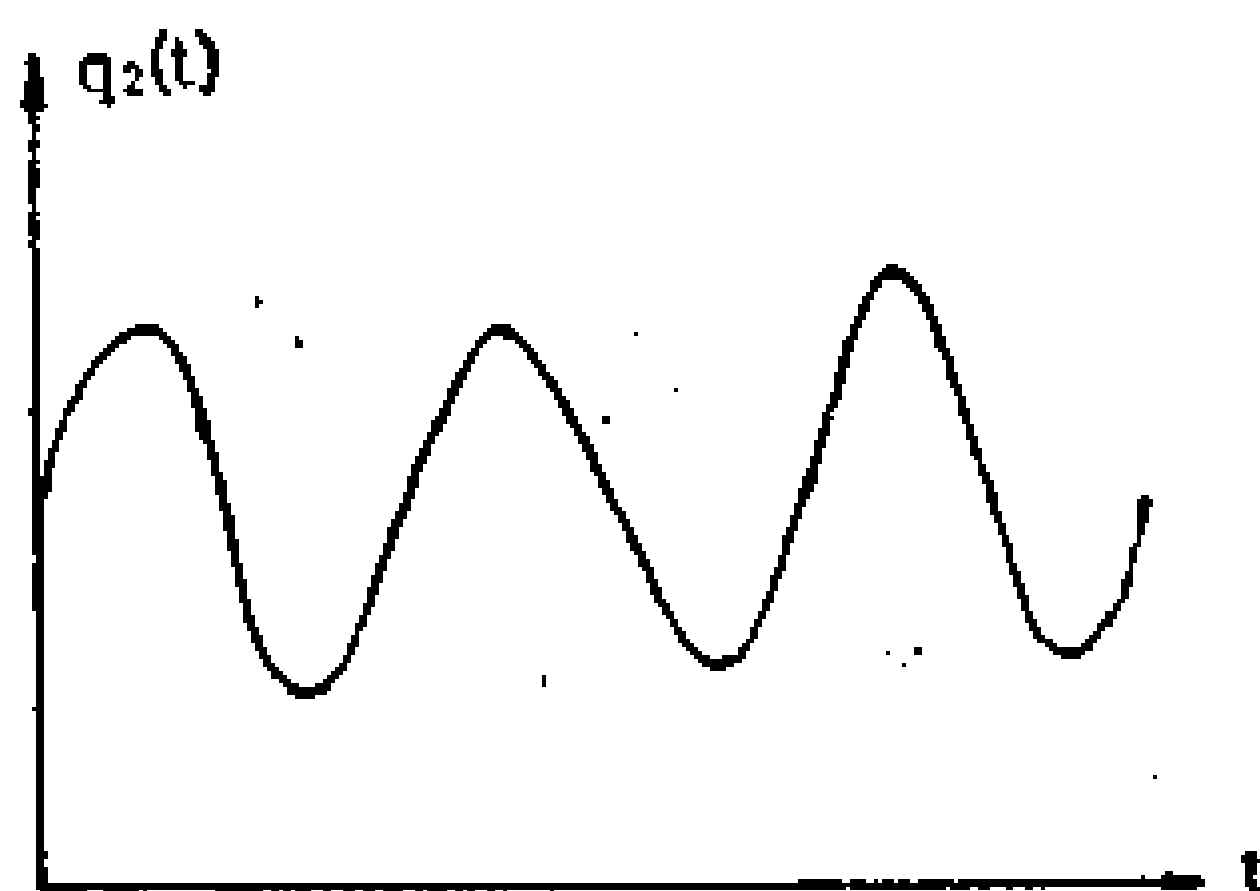


图 5.13 沿极限环运动的变量 $q_2(t)$

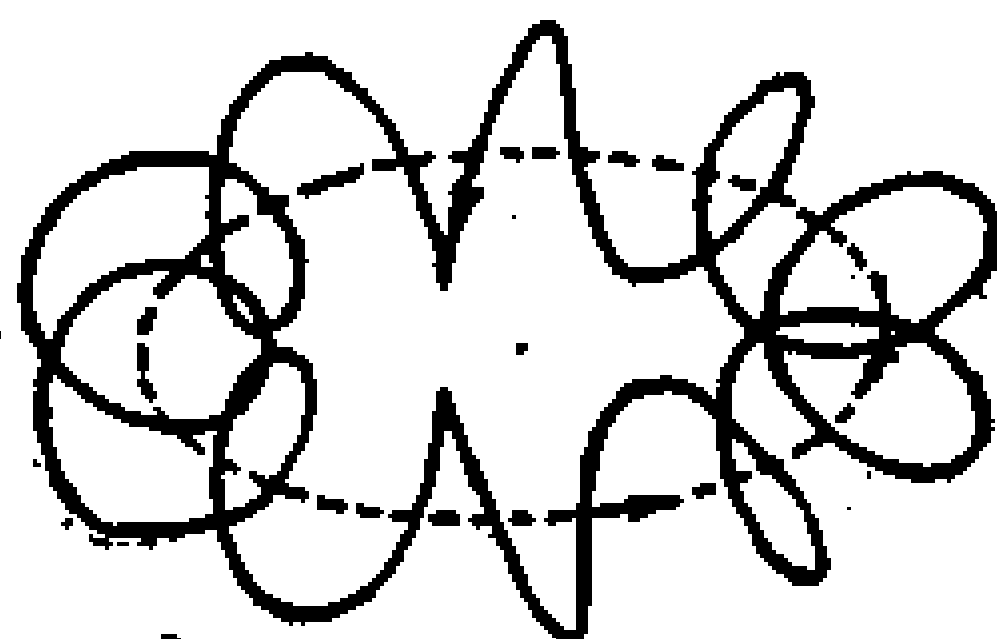
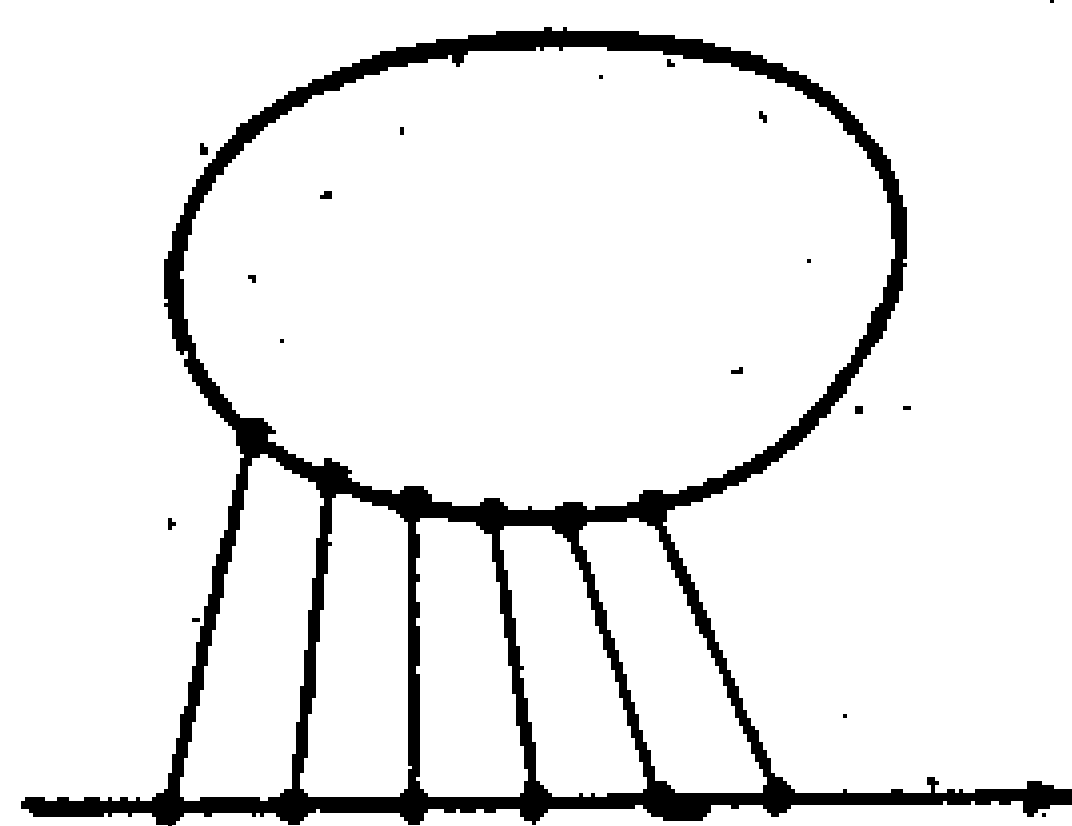
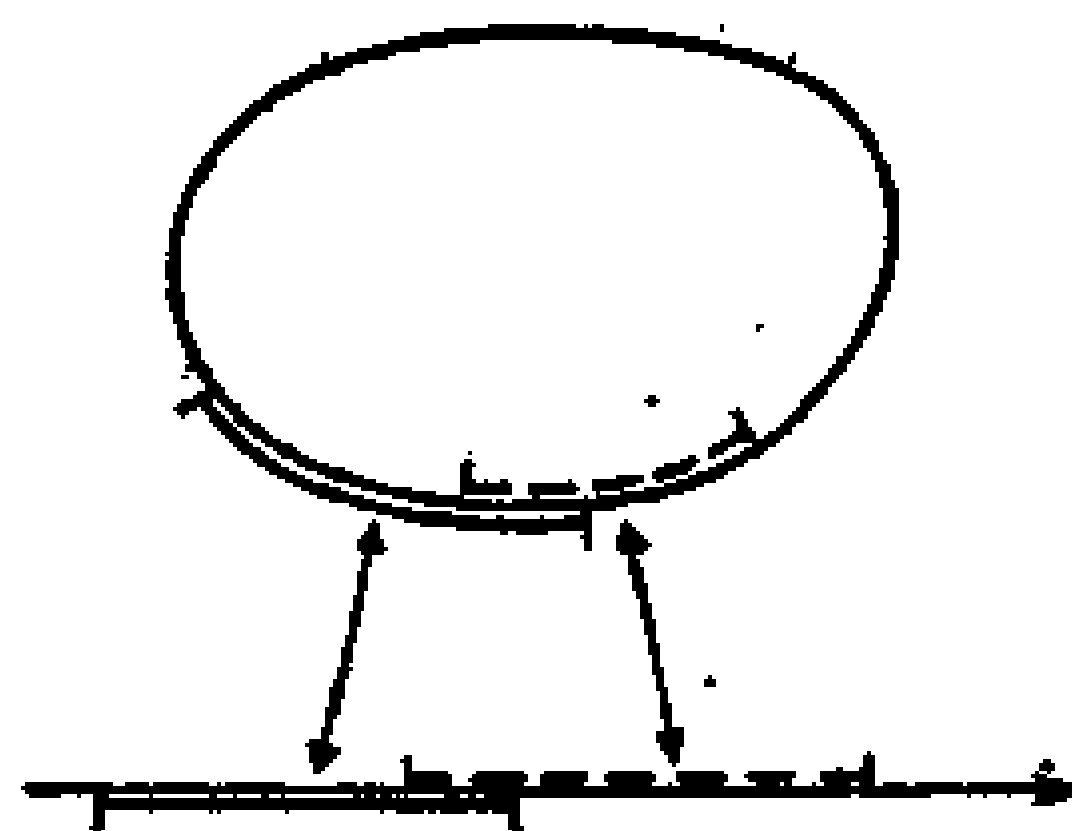


图 5.14 三维空间的极限环



(a) 流形及其各点映象



(b) 流形及其交迭部分映象

图 5.15 流形及其映象

图 5.14 表示三维空间上的极限环。

我们可以从轨道的形式——流形上考察吸引子的某些特

征。图 5.15(a) 所示的极限环流形中，流形上的每个点可以映象为一个区间上的一点，反之亦然。流形上的交迭部分映象为线上的交迭部分，反之亦然，如图 5.15(b) 所示。流形上的每个区间对应于线上的一个确定区间。

(3) 环面

二维以上的吸引子表现为相空间中相应维数的环面。图 5.16 表示三维空间上的二维环面。环面上的运动是否是周期的，这取决于诸运动方向频率之比。如果诸频率之比呈有理比例关系，就有周期运动，绕线闭合，在环面只有一些线缠绕。如果诸频率之比呈无理比例关系，则有准周期运动，绕线不闭合，随着时间的推移，轨道可以任意接近任何给定的点，因此整个环面将被轨道所充满。一般，高维环面上的运动往往是准周期的。

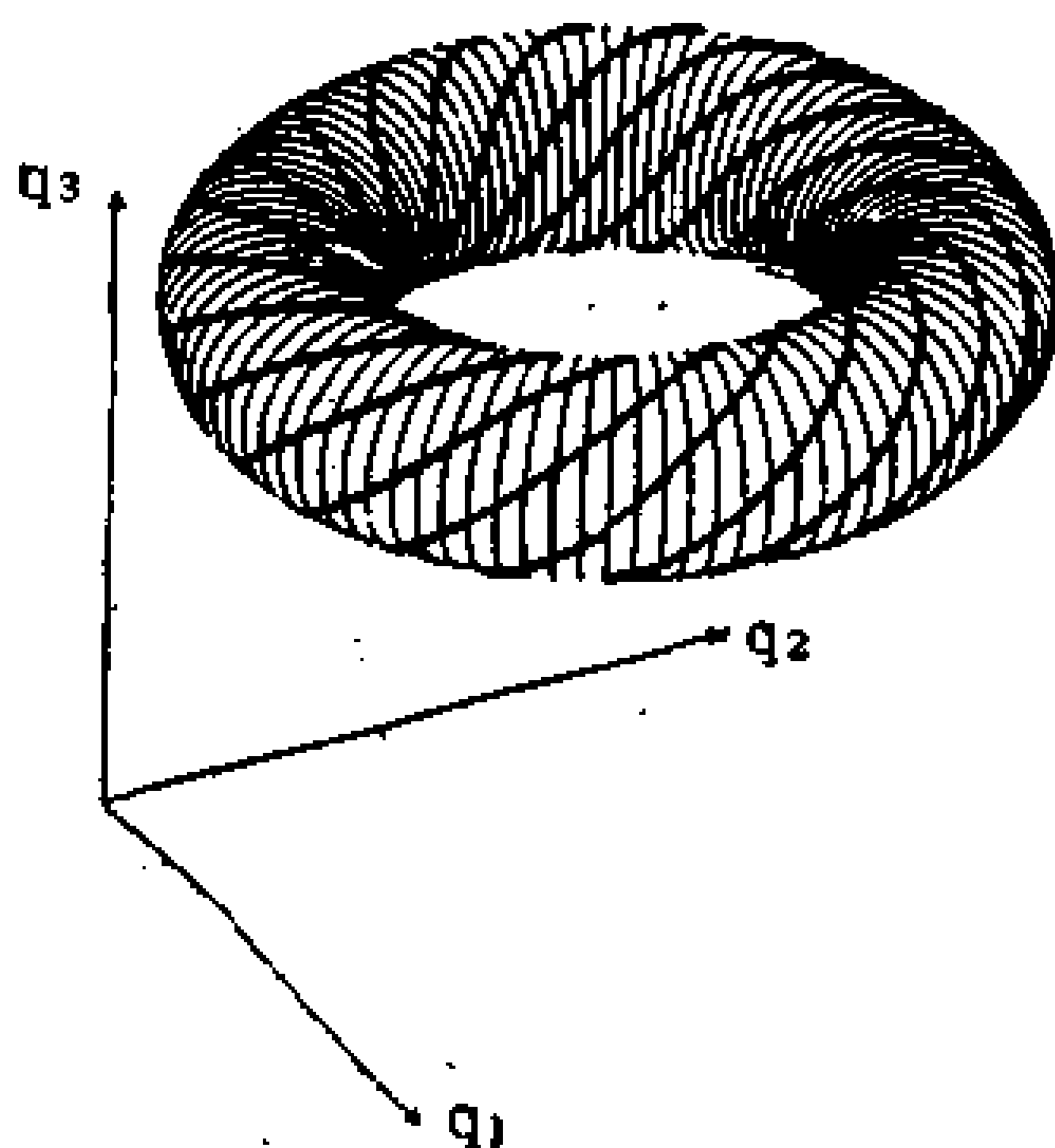


图 5.16 二维环面

(4) 混沌吸引子

上面所看到的三种吸引子即不动点、极限环和环面通称为平庸吸引子。非线性系统可能有 $0, 1, 2, 3, \dots$ 等各种维数的平庸吸引子。高维吸引子上的运动最可能是准周期运动，而不是周期振荡。现已看到，准周期运动成为平庸吸引子的可能性不大，更可能出现的是所谓混沌吸引子，或被称为奇怪吸引子、随机吸引子。

混沌吸引子的出现看来可以用“吸引”和“排斥”这一对古老的两极对立的统一来说明。一方面，耗散运动的轨道最终要被吸引到（即收缩到）相空间的有限区域即吸引子上，另一方面运动轨道从局部看来又是不稳定的，要沿某些方向指数分离。为在有限的几何对象上实现指数分离，就要无穷次地折迭起来，造出一种新的几何对象——混沌吸引子。向量 $q(t)$ 一旦进入这样的有限区域，它就“永远”留在那里。但它的轨道不落在一个流形上。结果，向量 $q(t)$ 就象一根在线团中穿来穿去的针那样运动。

混沌吸引子较之平庸吸引子有不少“奇怪”之处，例如：

(i) 混沌吸引子是一种整体稳定、局部不稳定的运动状态。它有内外两种运动方向：吸引子外部的一切运动都被它吸引，向它靠拢，这是稳定方向，而吸引子内部的一切运动轨道都互相排斥，这是不稳定方向。

(ii) 混沌吸引子上的运动对于初始条件十分敏感。进入混沌吸引子的初始位置稍有差异，运动轨道就截然不同。

(iii) 混沌吸引子作为相空间中的子集，往往具有非整数的维数。而且，它本身的维数必须大于零，否则运动轨道无法相互排斥。零维之下没有混沌吸引子，只有不稳定的不动点。

(iv) 混沌吸引子具有无穷嵌套的自相似结构。与混沌吸

引子的非整维数一样，无穷嵌套的自相似结构的出现是与无穷折迭有关的。这种结构可以向大小两个方向无限地重复下去。

从以上的讨论中，我们看到了方程 5.1 可能会产生的丰富多采的结果。系统进化的趋向是各种各样的吸引子，可分为不动点、极限环、环面以及混沌吸引子。总的来说，极限环比不动点复杂，环面比极限环复杂，而混沌吸引子比环面复杂。如果要把这些吸引子都显示在一个相空间上，则需要把整个相空间划分为多个“流域”。每个流域中的各点在 $t \rightarrow \infty$ 时都趋向一个特定吸引子，系统的长时间行为依赖于初始点所在的流域，但同一流域中的各点都会达到同一个吸引子。吸引子上的运动对应于定态；吸引子外的运动乃是暂态过程。暂态过程的研究将会显示出比吸引子的行为更丰富多采的结果，但是我们在这里的讨论主要局限于吸引子，因为各种吸引子可用来表示系统进化的不同阶段。

第三节 系统进化中的质变

一、系统质变的一般研究

在错综复杂的系统进化过程中，既有量变又有质变，既有渐变又有突变。在系统量变的描述中很常见的是指数增长模型，S 型增长模型等。但是，一种系统变为另一种系统，或各种系统中发生的无序-有序、有序-有序或有序-混沌转变则是质变过程。因此在系统进化研究中必须把质变当作中心问题来研究。

就渐变与突变的关系而言，人们在相当广泛的领域发现，各

种系统在渐变过程中表现出很强的个性，但在发生突变的关节点附近它们的个性就退居次要地位，一些共同特性支配着突变过程，例如对称破缺①、临界慢化②、临界涨落③等特性在相变点附近出现。又如，在各种相变中，比热随时间的变化会在相变点附近出现一个尖峰，而各种不同系统相变的比热尖峰曲线只需调节其比例关系就可以迭合在一起。这样，在系统进化研究中，至少在目前人们把注意力集中于各种不同类型突变的共性上。

1. 系统的质

为讨论系统的质变，必须先知道系统的质是怎样被规定的，又要知道哪些因素引起系统的质变。不言而喻，讨论各种具体系统的质及其变化是各门具体科学的任务，而在系统科学中我们所要研究的是一般系统或系统自身的质及其变化问题。研究表明，在一般情况下，系统的质通常由其各要素的质、数量、运动量与排列次序这四个因素的相互交错、相互作用而确定，从而形成千差万别的各种系统。因此，系统质可表示为要素的质与量的函数：

$$Q_s = \Phi(Qe_i, Ne_i, Ee_i, Oe_i), \quad (5.2)$$

其中： Q_s ：系统的质； Qe_i ：各要素的质； Ne_i ：各要素的数量； Ee_i ：各要素的运动量； Oe_i ：各要素的排列次序，且 $i=1, 2, \dots, n$ 。同时，研究还表明，这四个因素在规定系统质时所起的作用并不相同。首先，要素的质作为一个独立因素而规定系统的质，不同质的要素理所当然地构成不同质的系统。其次，要素的数

①②③ 对这三个概念的解释，请看本节第三部分。

量与运动量并不是规定系统质的独立因素。要素的不同数量与不同运动量只能为系统的质的差异提供可能性，但是其本身不能为系统质的差异提供现实性，使这种可能性转化为现实性的乃是各要素的排列次序。或者说，要素的数量和/或运动量的变化为系统的质变提供可能性，而要素的排列次序的变化使可能性转变为现实性。最后，要素的排列次序完全可以作为一个独立因素，亦即独立于要素的数量与运动量而规定系统的质，如象在手性系统中所看到的那样。

2. 系统质变的一般描述

我们可以从式 5.1 出发找出系统质变的一般描述方法。不过，我们无法根据要素质在系统质变中的作用而建立这种一般方法，因为这种作用中我们所能知道的只是不同类型质变之间的区别，而不是共性。我们也无法根据要素的数量和运动量在系统质变中的作用而建立这种一般方法，因为它们不是规定系统质的独立因素。这样，我们只能寄希望于第四个因素即各要素的排列次序。实际上，科学家已在用各要素的排列次序来研究系统质变的一般描述方法方面作了大量工作。

最重要的概念之一是所谓结构稳定性。如果系统控制参量的小变化不引起系统状态的大变化，就称该系统是结构稳定的；如果控制参量的小变化导致系统状态的大变化，就称该系统不是结构稳定的，这时就要发生分歧^①。这样，结构不稳定性就表示着系统的质变现象。

① 英文词 Bifurcation 在目前的中文文献中有多种译法，如分歧、分支、分岔、分叉等。本书中采用“分歧”。

现在我们来讨论如何检验控制参量的变化是否引起结构不稳定性的问题。

设想一个在势场中运动的小球，一开始势函数曲线如图 5.17(a) 所示，球将停留在 $q=0$ 。适当改变控制参量，势函数曲线可变为如图 5.17(b) 所示，球将停留在 $q=+\alpha$ 或 $q=-\alpha$ 。这个小球的流图很简单。如果势曲线只有一个极小值，就得图 5.18(a)；如果有两个极小值，就得图 5.18(b)。从图 5.17(b)，还能看出涨落的重要性。如果小球原先位于 $q=0$ ，那么它将掉进哪一侧的凹处将完全取决于涨落。

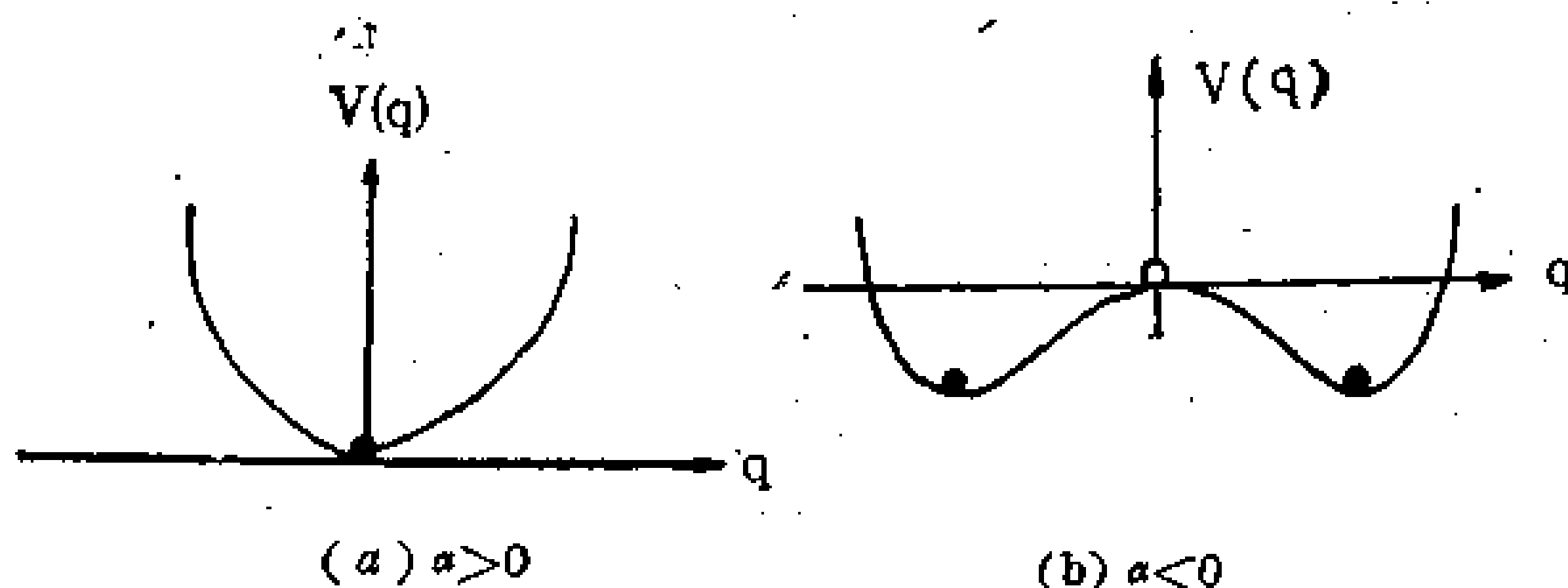


图5.17 小球在势曲线上的平衡位置

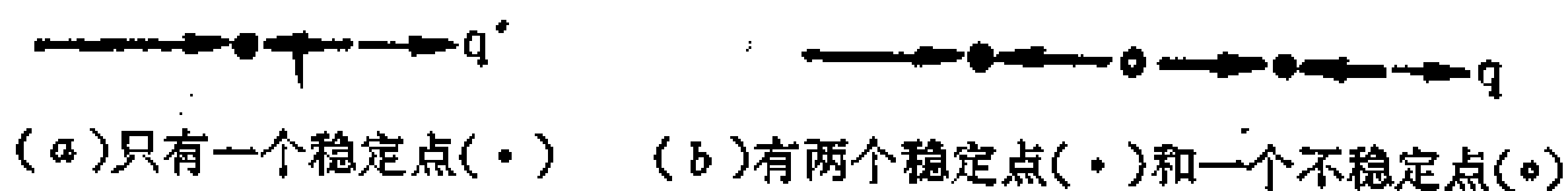


图5.18 小球的一维运动

在图 5.17 中，小球的运动方程是：

$$\dot{q} = \alpha q - |k|q^3, \quad (5.3)$$

其中 α 与 k 表示有关参数。

取平衡点

$$\dot{q} = 0$$

那么(a)与(b)两种情况分别为:

(a) 当 $\alpha > 0$ 时, 唯一解为

$q = 0$, 稳定的。

(b) 当 $\alpha < 0$ 时, 有三个解, 即

$q = 0$, 不稳定的,

$q = \pm \sqrt{|\alpha|/|k|}$, 稳定的。

显然, 当 α 从正值逐渐变为负值的过程中, 在 $\alpha = 0$ 时, 稳定平衡位置 $q = 0$ 变为不稳定的, 而 α 变为负值后出现两个稳定平衡位置。

但是在许多实际问题中, 系统并不存在势函数。因此需要采用所谓线性稳定性分析。引入一个小的时间关联偏差 u , 使得方程 5.3 的解 q 为

$$q = q_0 + u = u$$

将此式代入方程 5.3, 只保留线性项, 则对于 $\alpha < 0$, 有

$$\dot{u} = |\alpha|u,$$

其解为

$$u(t) = u(0)e^{|\alpha|t}$$

因 $|\alpha| > 0$, $u(t)$ 便以指数增长。这表明 $q_0 = 0$ 的状态是不稳定的。

在线性稳定性分析之后, 就要判定系统将进入哪一种新状态。考虑下列两个微分方程:

$$\dot{q}_1 = \lambda_1 q_1 - q_1 q_2, \quad (5.4)$$

$$\dot{q}_2 = -\lambda_2 q_2 + q_1^2, \quad (5.5)$$

这组方程适用于许多领域。例如在化学上, 方程 5.4 表示浓度为 q_1 的化学物质按 $\lambda_1 q_1$ 自催化地生成, 而由于与浓度为 q_2 的

另一物质的相互作用按 $-q_1q_2$ 分解。方程 5.5 的第一项表示浓度为 q_2 的化学物质的自发分解，第二项表示由于 q_1 的双分子过程而发生的 q_2 的生成。

在此我们主要讨论这些方程的数学特性。设 λ_1 很小且为正。这时，只要 q_1 和 q_2 是小量，在一级近似下就可忽略二次项，因此由方程 5.4 可知 q_1 变化很慢。由方程 5.5 知， q_2 是由 q_1^2 驱动的。但由于 q_1 变化很慢，便可认为 q_2 变化也很慢。如果 λ_2 为正且远大于 λ_1 ，那么同 λ_2q_2 相比就可忽略 $\dot{q}_2$ 。令

$$\dot{q}_2 \approx 0,$$

可从方程 5.5 得

$$q_2 \approx q_1^2 / \lambda_2$$

这个方法通常被称为绝热近似。据此我们可用 q_1 具体表示 q_2 ，或者说 q_2 被 q_1 役使。按照这种役使原理^①，当我们处理被 q_1 役使的大量变量时，就能大大减少系统自由度，简化复杂问题。这样，在求解进化方程 5.1 时，不求解 q 的 n 个方程，只求解 q_1 的单个方程即可，而其余的 q 都由 q_1 表示出来。这时， q_1 称为序参量。当然，方程数目可能非常多，它们可能有含时系数，还含有涨落力。但是更细致的研究表明，在同一时刻 t ，用 $q_1(t)$ 来表示 $q_2(t)$ 是确实可能的，并且对于一大组非线性随机偏微分方程（即进化方程 5.1）可以设计显式方法来找出函数

① 所谓役使原理，是由哈肯首次提出，在他的协同学中居于核心地位。役使原理指出：大量物理系统和非物理系统通过不稳定性可以自发形成空间结构、时间结构或时空结构。当这些系统接近不稳定点时，系统的动力学和突现结构通常由少数几个集体变量即所谓序参量决定，而系统其他变量的行为则由这些序参量（和随机力）规定。

$q_2(t) = f(q_1(t))$ 。线性稳定性的丧失、序参量的出现以及役使原理的有效性这三者之间存在着重要的内在联系。当控制参量变化时，一个系统会失去线性稳定性。如同由方程 5.4 与 5.5 中所知，在这种情况下本征值的实部 $Re\{\lambda_1\}$ 变得很小且改变了符号。这时，役使原理发挥作用。于是我们就可以认为在结构发生变化的那些关节点上，序参量支配着系统的行为。正是这种内在联系使得我们为在完全不同的系统中发生的宏观变化建立广泛的类比，揭示系统进化的一般规律，尤其是系统质变的一般原理。

二、分 歧

不稳定性表示质变，而质变可用分歧和相变来说明。这里我们先讨论分歧。

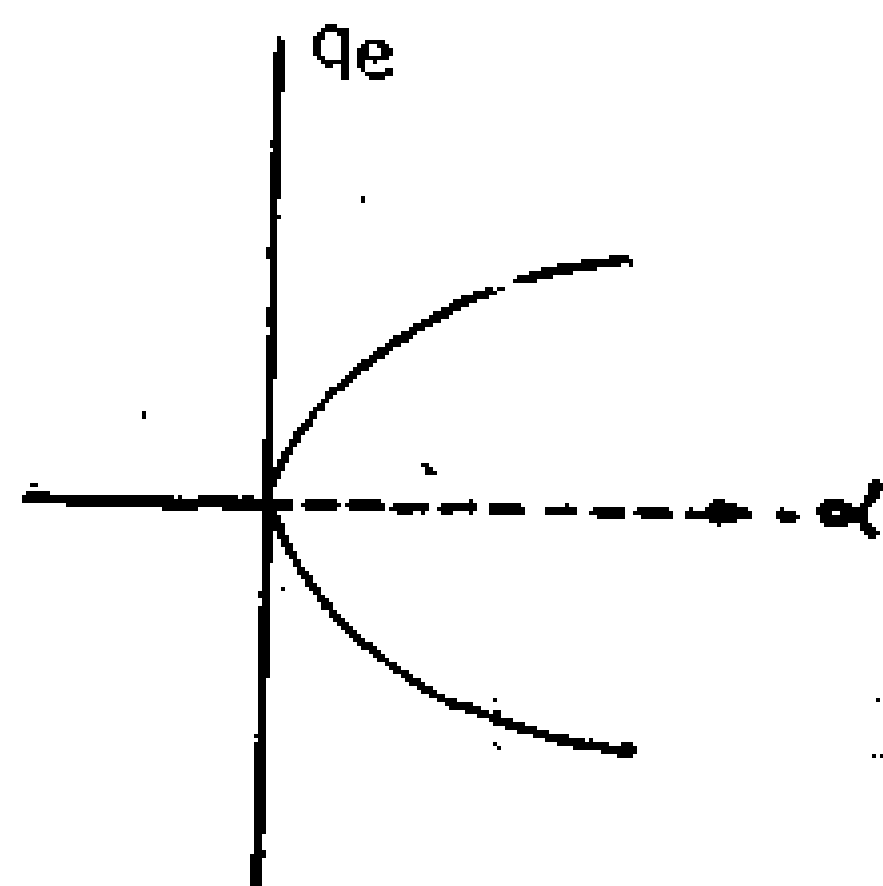


图5.19 作为 α 函数的平衡坐标 q_e 。

在图 5.17 中，我们在势曲线上表示了小球的平衡位置。如果我们把平衡位置 q_e 表示为 α 的函数，便得到图 5.19。图中，对于 $\alpha > 0$ ， $q_e = 0$ 是稳定的。但对于 $\alpha < 0$ ， $q_e = 0$ 变成不稳定的（以虚线表示），而出现了两个稳定平衡位置（以实线表示）。这样，我

们有下列图式：



因为这个图式有叉的形状，整个现象就称为分歧。

为了更广泛地讨论分歧现象,我们考虑系统进化方程 5.1。
如果忽略噪声影响,就得

$$\dot{q} = N(q, \alpha, \nabla, x, t) \quad (5.6)$$

假定 N 不显含时间,即讨论自治系统。又忽略任何空间依赖关系,则方程 5.6 变为

$$\dot{q}(t) = N(q(t), \alpha) \quad (5.7)$$

设对于控制参量 α 的某一定值(或值的某一区间),方程 5.7 有一稳定解 $q_0(t, \alpha)$ 。为讨论 α 变化时该解的稳定性,设

$$q = q_0 + w(t), \quad (5.8)$$

其中 $w(t)$ 是一小量。将式(5.8)代入式(5.7),只保留 $w(t)$ 的线性项,则

$$\dot{w} = Lw, \quad (5.9)$$

其中 L 是 q_0 的函数,且 L 与 N 有关。现在只需知道 L 与 q_0 的时间关系相同就够了。

设 q_0 与时间无关。为求解方程 5.9,设

$$w(t) = e^{\lambda t} v, \quad (5.10)$$

式中 v 为常向量。将式 5.10 代入方程 5.9,得

$$Lv = \lambda v \quad (5.11)$$

这是常向量 v 和本征值 λ 的线性代数方程。为说明一般方法的主要特性,我们假定矩阵 L 的有限维数是 n 。那么至多有 n 个不同本征值 λ , 依赖于控制参量 α 。而如果至少有一个本征值取得非负实部,就会发生不稳定性,出现分歧。

下面,我们将定性地考察各种分歧现象。

1. 单结点分歧为双结点

从图 5.17、图 5.18 和图 5.19 中得知,以方程 5.3 表示的系

统,当 $\lambda_1 < 0$ 时,解表示为一个结点。当 $\lambda_1 > 0$ 时,则有两个结点。当 λ_1 由负变正时,原来的单结点分歧为双结点。

一个稳定结点分歧为两个稳定结点,可以有两种方式,如图 5.20 所示。在上图中,分歧前后的流图被绘制于同一个平面上。在下图中,横轴上画出控制参量 λ ,而绘有流图的两个平面则与 λ 轴相垂直。

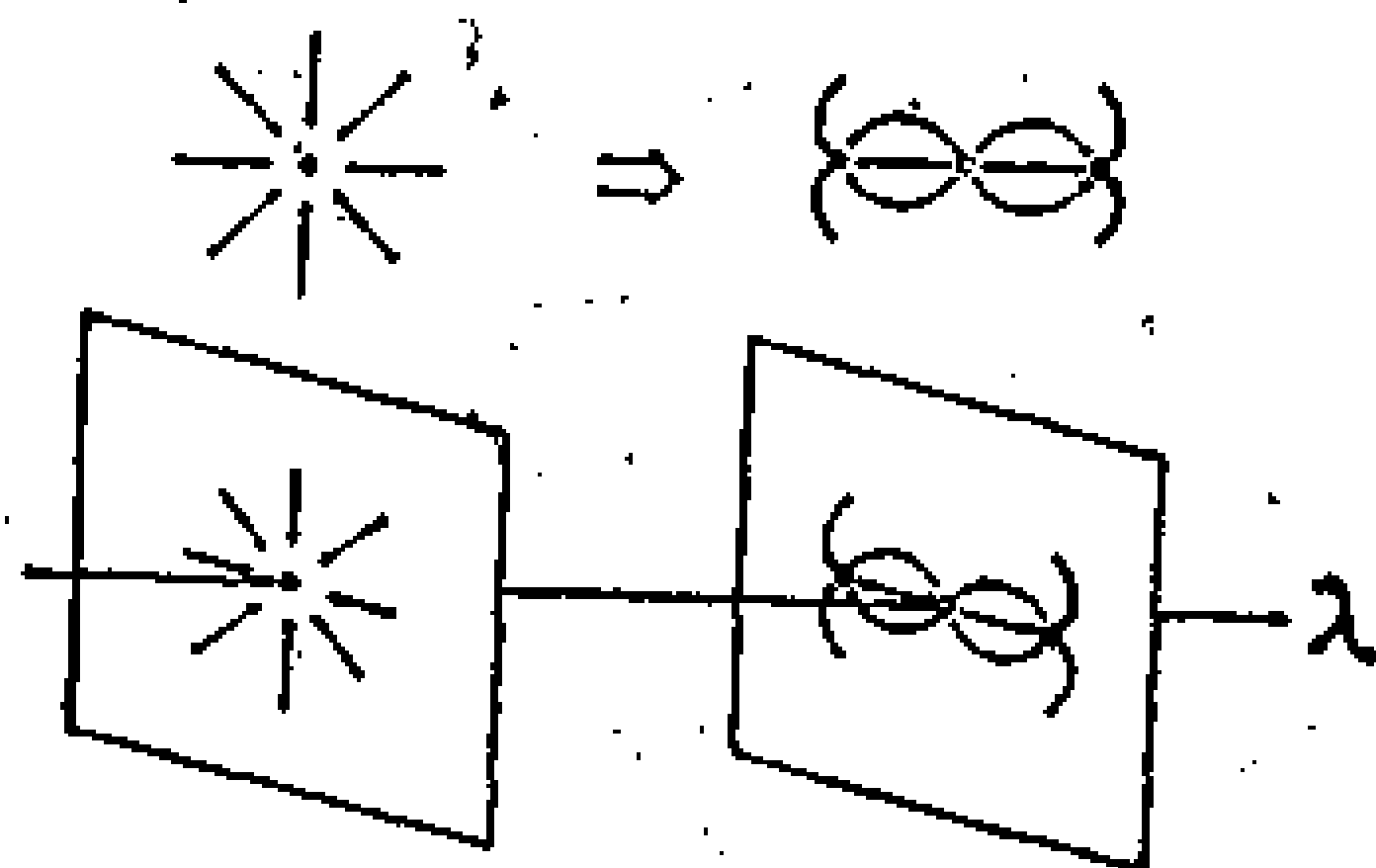


图5.20 单结点分歧为双结点

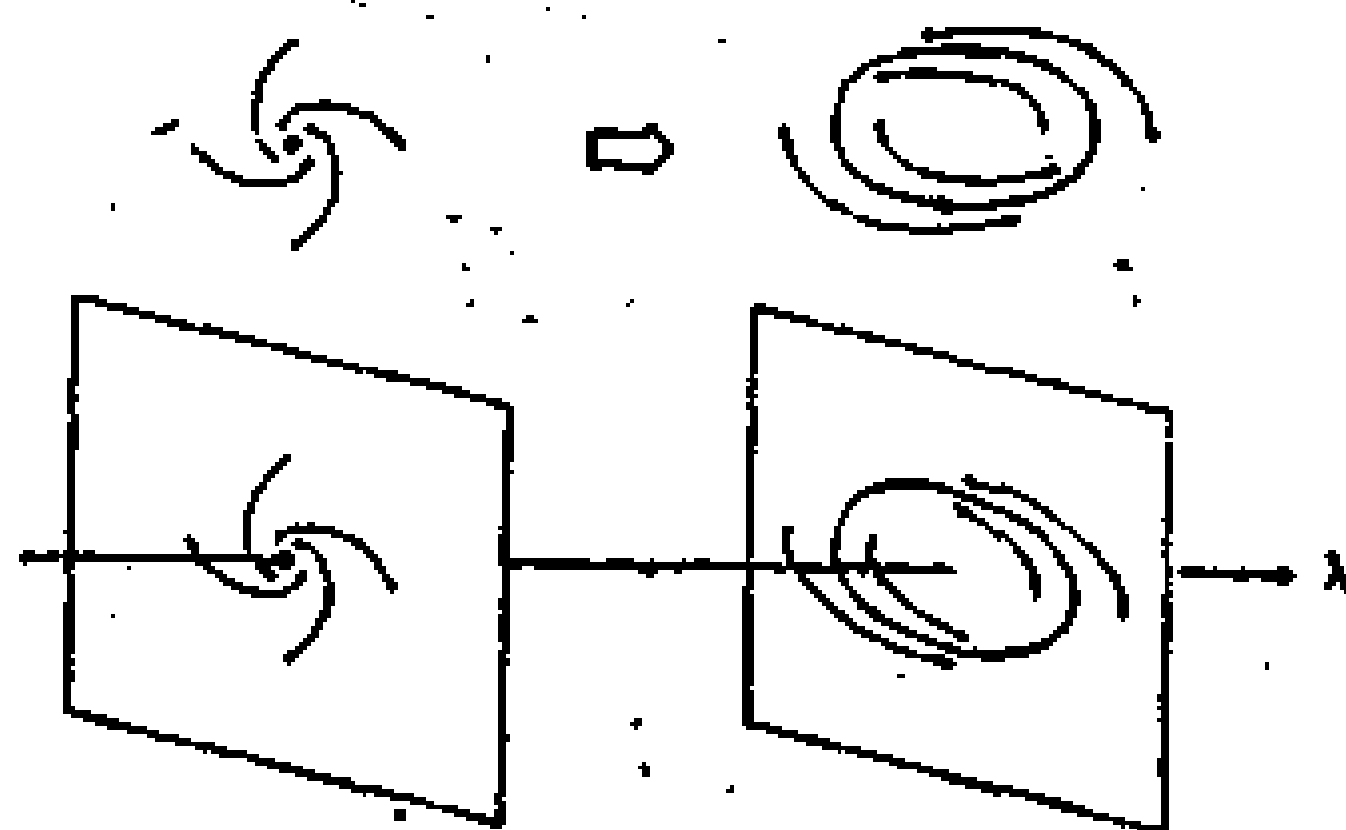


图5.21 焦点分歧为极限环

此外,单焦点亦可分歧为双焦点。

2. 焦点分歧为极限环

这种分歧通常叫作霍卜夫分歧,表示现实系统由阻尼振荡

状态过渡到无阻尼振荡状态，如图 5.21 所示的情形。这时，系统有两个复共轭本征值：

$$\lambda_1 = \lambda' + i\omega, \lambda_2 = \lambda' - i\omega, \quad (5.12)$$

其中 λ', ω 为实数且不等于零， ω 表示振荡频率。当这两个本征值穿越虚轴时，实部改变符号，系统失稳， $\lambda' \geq 0$ 。系统中出现振荡，原来的稳定焦点分歧为一个极限环。

由焦点到极限环的霍卜夫分歧可以形象地理解如下。在一个稳定焦点附近，代表系统运动状态的流线从四面汇聚到焦点，如图 5.22(a) 所示。不稳定焦点是流线的源，所有的流线都向外散开，如图 5.22(b) 所示。假定控制参量的小变化使稳定焦点失稳，焦点附近的局部情况就要由图 5.22(a) 变到 (b)。但是一般说来，参量的这种小变化还不足以使整个流域内“河水倒流”，距焦点较远处的流线仍应是向中央汇聚的。近处向外，远处向内，结果在某个适当位置上出现一条封闭曲线，成为内外两种流线的共同极限，如图 5.22(c) 所示。这就是一个极限环。类似的几何考虑也可用于理解高维环面的形成。

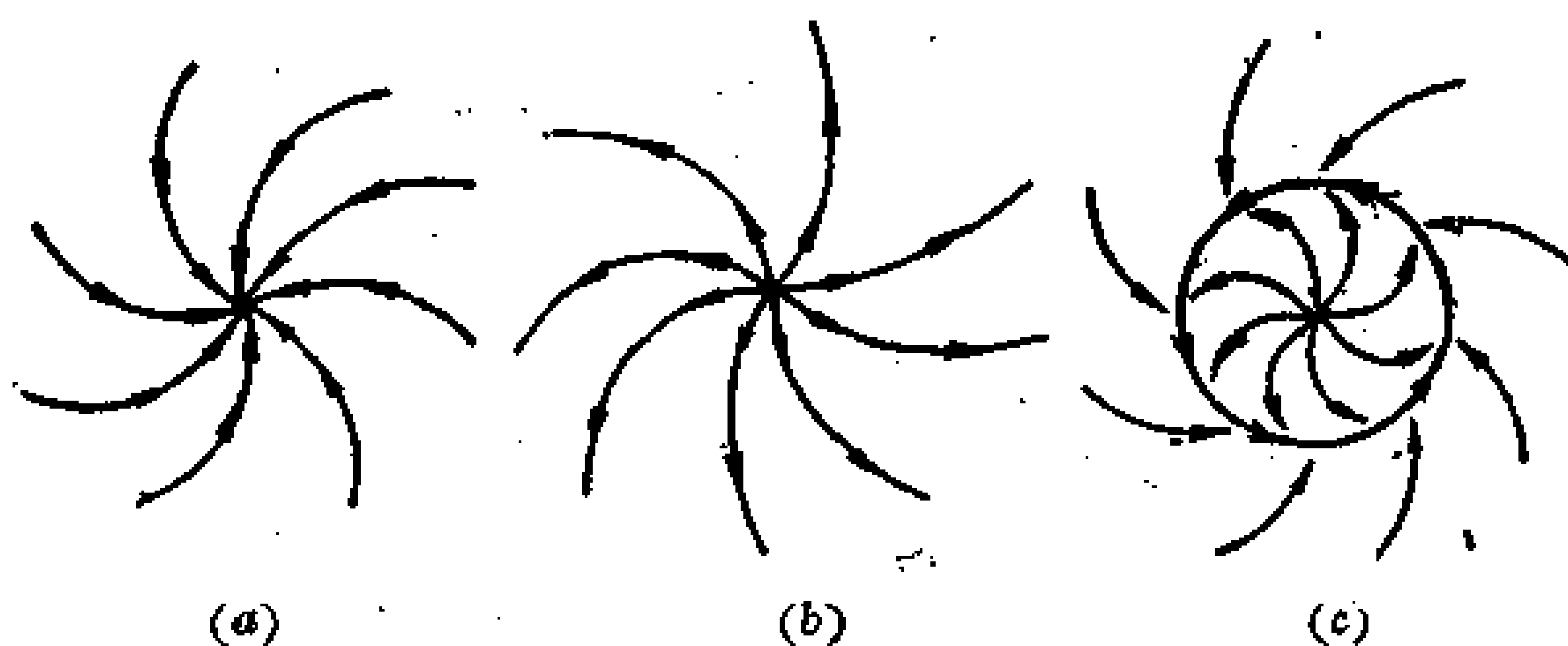


图5.22 霍卜夫分歧原理示意图

3. 极限环的分歧

在一些实际案例中，控制参量的进一步变化会导致极限环的不稳定性。这就需要扩展式 5.10 形式的线性稳定性分析，因为极限环上的运动是用含时的 $q_0(t)$ 描述的。因此式 5.9 中的 L 变成 t 的周期函数。这时我们再次可以用式 5.10 中的 λ 来研究稳定性。

如果单个实数本征值 λ 变为正的，原极限环可分裂为两个新极限环，如图 5.23 所示。原极限环变为不稳定的，图中以虚线表示之。图 5.24 表示分歧前后，极限环变量 $q_1(t)$ 的时间行为，实线和点划线表示稳定情形，虚线表示不稳定情形。

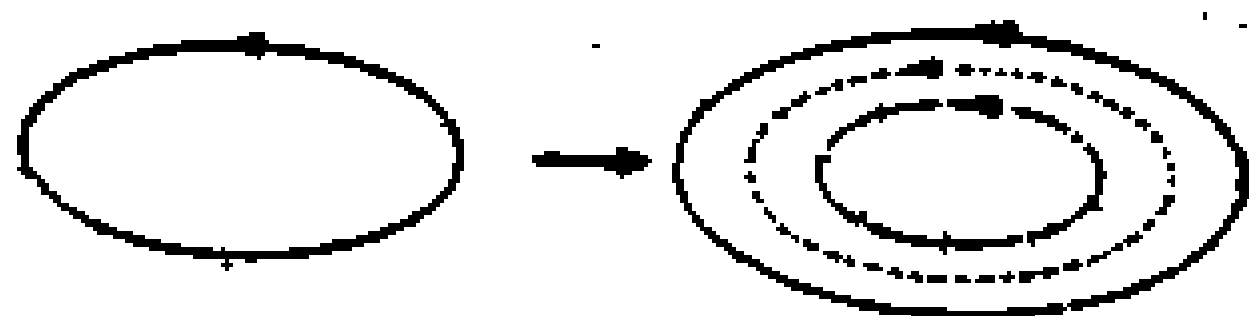


图5.23 一个极限环分歧为两个极限环

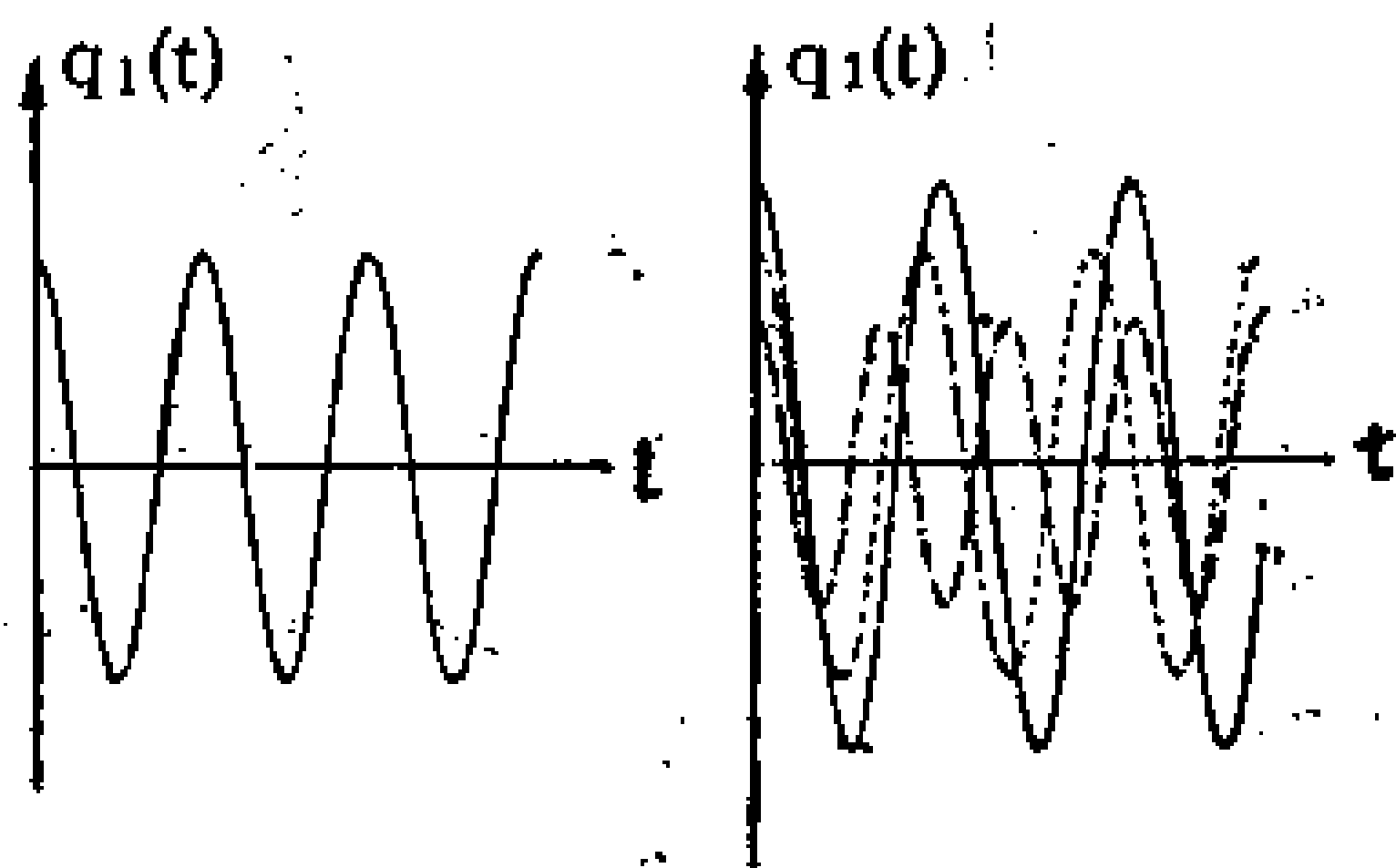


图5.24 变量 $q_1(t)$ 的时间行为

另一方面，如果复共轭本征值（方程式 5.12）取得了正实部，一个新极限环就迭加在原极限环上。解向量 $q(t)$ 的这一新

运动可以看作是环面上的运动，即一种准周期运动。例如在图 5.25 和图 5.26 中，二维空间的极限环分歧为三维空间的极限环。根据第二节中的讨论可知，如果轨道是封闭的，就出现新极限环；如果轨道是不封闭的，轨道就会充满整个环面。

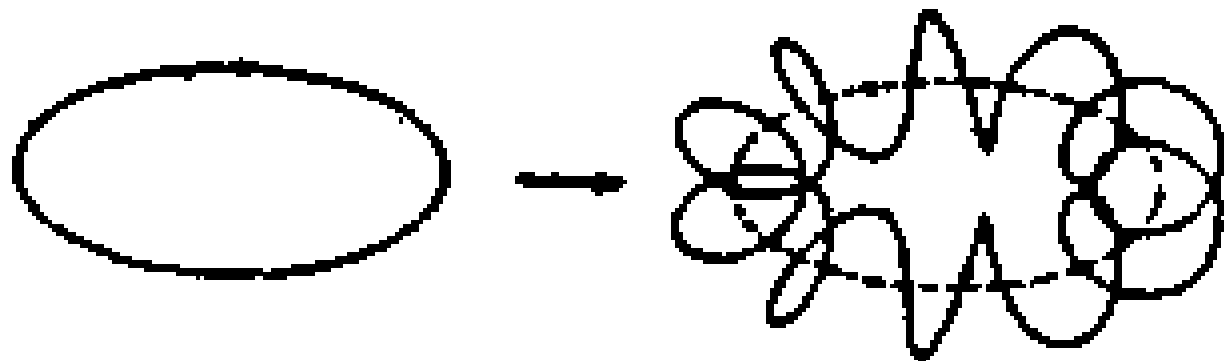


图5.25 二维空间的极限环分歧为三维空间的极限环

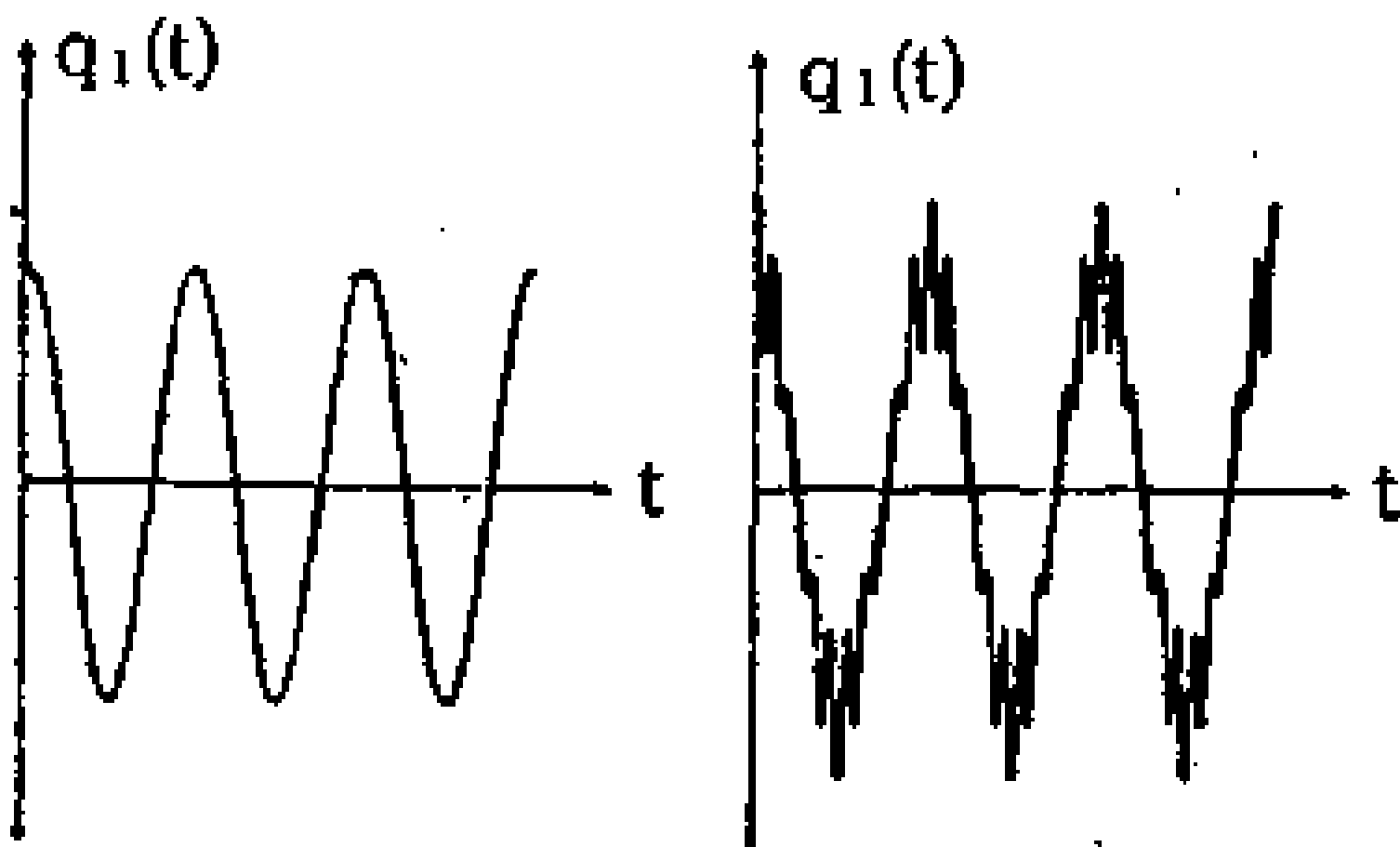


图5.26 变量 $q_1(t)$ 的时间行为

当一个极限环变为不稳定时，还可以出现其他现象，如倍周期即次谐波现象。这在电子学中是早已熟知的现象。杜芬方程

$$\ddot{x} + k\dot{x} + x^3 = A \cos t \tag{5.13}$$

描述非线性振荡器对周期驱动力的响应。其中， $q_1 \equiv x, q_2 \equiv \dot{x}$ 。杜芬方程轨道从 q_1, q_2, t 空间到 q_1, q_2 平面的投影可示为图 5.27。从(a)到(b)再到(c)的演变是随着控制参量(此例中即为

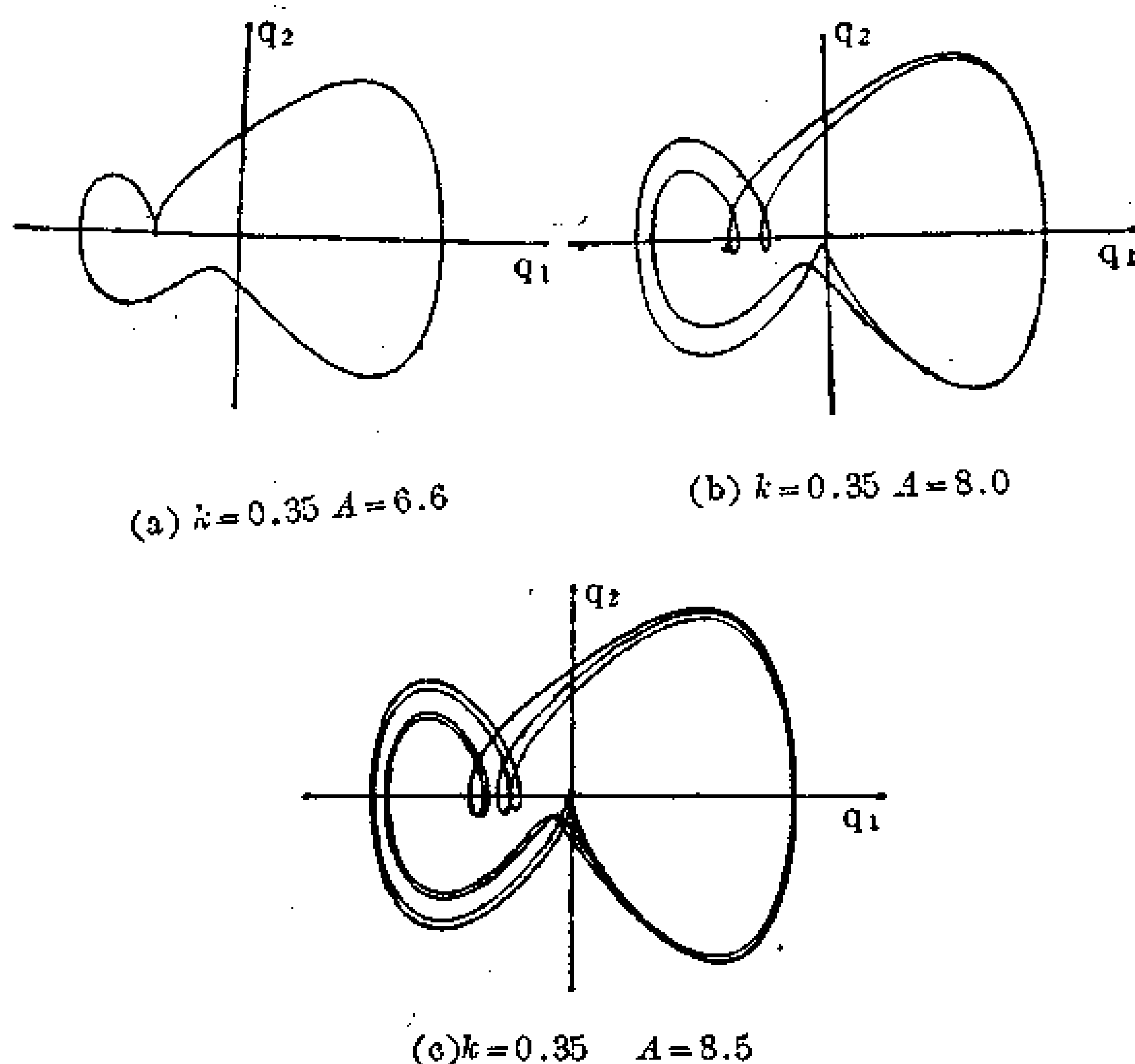


图5.27 倍周期分歧中的轨道变化

A)的变化而发生的:

显然,上图中的(a)为一极限环,(b)的周期为(a)的两倍,而(c)的周期又是(b)的两倍。这就是倍周期分歧的一个典型例子。从(a)到(b)的变化意味着原来的周期轨道劈裂为二,劈裂的程度可以微乎其微,但绕行一周的时间增加为原来的两倍,而由(b)到(c)的劈裂使绕行一周的时间增加到原极限环的四倍。值得注意的是,至少在三维及其以上的相空间中才能既发生劈裂,又保证轨道互不相交。

4. 单环面分歧为其他环面

近年来, 一个环面分歧为相同维数或较高维数环面的问题受到人们重视。数学分析表明, 系统的基频 $\omega_1, \omega_2, \dots$ 的无理性条件起着决定性作用。如果这些频率彼此具有某种无理性, 二维环面可能分歧为三维环面。进一步的研究表明, 为确定实际系统是否产生这种分歧, 必须应用概率论证。在微观层次上涨落影响着实际频率, 因此关于环面分歧的讨论必须考虑这些涨落。对于一个给定的系统来说, 可能存在着控制变量或其他变量的某些区域, 在那里可能相继发生环面分歧。但是当进入高维环面时, 这种转变越发艰难, 最有可能出现的是混沌。

5. 混沌吸引子

当控制参量的变化引起一个环面上的运动变为不稳定时, 如果频率之比的无理性条件得不到满足, 那么流 $q(t)$ 可能出现各种很不同的情况。一个环面可能崩溃回到极限环, 系统突变到锁频状态, 锁到一个或几个频率上, 然后经过倍周期分歧进入混沌区。图 5.28 所示的是功率谱 $I(\omega)$ 怎样显示锁频。在左图中, 在未锁定状态下, 系统按两个基频 ω_1 和 ω_2 振荡。右图

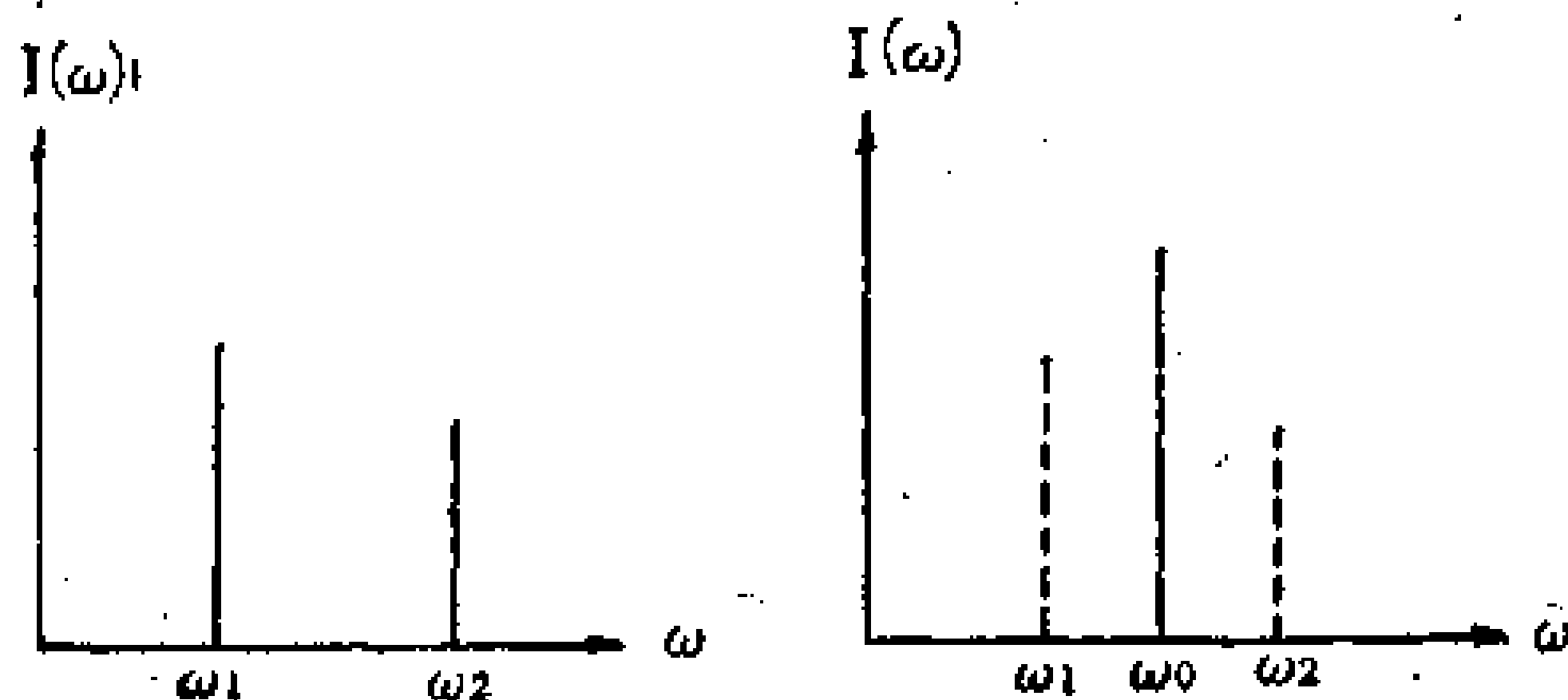


图5.28 锁频现象

表示锁定状态下的功率谱。两个原频率 ω_1 和 ω_2 消失, 频率 ω_0 取而代之。锁频状态下系统的运动是无规则的, 并且向混沌状态变化, 最后会导致混沌吸引子。

三、相 变

在以上的分歧问题的讨论中, 我们忽略了导致系统质变的一个决定性因素即涨落。但是, 只要我们所考虑的是由大量要素组成的系统, 只要我们所考虑的是发生物能耗散的开放系统, 就不能从实际的质变研究中忽略涨落, 尤其在分歧点 (或临界点) 更是如此。涨落使已足够困难的分歧问题转化成更复杂更困难的非平衡相变问题。不过, 在这一部分我们主要讨论相变的一些基本特征, 对于涨落问题我们将在第四节的第三部分中作更详细的说明。

1. 相与相变

系统内部的状态通常用“相”来表示。在物理和化学中, 相是指具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质部分。在系统研究中, 相概念已超出物理、化学领域, 在更抽象的意义上使用。在最广泛的意义上, 相可以理解为系统中具有相同的特定系统性质的均匀构成部分。例如, 一杯水, 其物理性质和化学组成是均匀的, 故是一相。水、汽与冰, 虽然其化学组成相同, 但物理性质不同, 故是三相。一个社会的经济系统, 如果认其所有制形式为相, 那么个体经济、集体经济和国营经济就可视为三个相。

如果一个系统只含有一个相, 就称为单相系, 如果含有两个或多个相, 就称为多相系。在多相系中, 相与相之间有“分界面”。在物理、化学系统中, 分界面通常是一目了然的, 并且可以用机

械方法把各相分隔开来。但在社会文化系统中，一般难以凭直观划分各相，“分界面”也难以精确确定，并且各相之间的渗透也极为严重。但这并不是说社会文化系统各相之间不存在“分界面”。

在一个系统中，相与相之间可以处于平衡也可以发生互相转变。例如，物体的固、液、气三态可相互转变，固体的同素异形体也可以相互转变。在社会经济发展中，有经济相之间的转变。人们把一个相转变为另一相的现象称为相变。相变就其某种特定性质而言，显然是一个质变过程。

相变通常分为平衡相变与非平衡相变。为说明这两种相变的基本特征，我们先来说明平衡与非平衡的区别。

2. 平衡与非平衡

在不同的学科中都广泛使用着“平衡”一词。这一概念首先是在力学中发展起来的。如果一个物体同时受几个力的作用，而物体运动状态不发生变化，就说这个物体处于平衡状态，或者说这几个作用力相互平衡。例如，桌上放着的物体，就是在地球引力和桌面托力的相互平衡下不改变其运动状态，即处于平衡状态。

在热力学和统计物理中使用的“热力学平衡”或“热动平衡”的概念是力学平衡概念的扩展。所谓热力学平衡，是指在一定外界条件下，物质系统的宏观状态保持不变。这时，从宏观上看，系统不发生任何物理、化学变化。从微观上看，热力学平衡系统并不是静止不动的，质点处在不断的运动中。更确切地说，从微观上看，热力学平衡的系统处在动态平衡，即在系统中不同方向的运动在不断进行，但它们势均力敌，相互抵消。例如，密

闭容器内水和汽的平衡,并不是指水与汽二者之间没有变化,而是水转化为汽和汽转化为水的速度相等;化学平衡也是如此,意味着反应物变为生成物和生成物变为反应物的速度相等。

当一个系统处于热力学平衡状态时,实则包含着下列三种平衡:第一、系统处于热平衡,即系统内部温度处处相等;第二、系统处于“力”平衡,即系统内部压力(即物理学上的压强)处处相等;第三,系统处于相平衡,即系统内部化学势处处相等。

对孤立系统来说,热力学平衡态是高熵态,是无序的;对封闭系统来说,如果系统的温度足够地低,则有可能形成低熵有序结构,如晶体、液体等。这种有序结构是热力学平衡态下的静态结构。

但是,平衡是相对的、特殊的、暂时的和局部的,而不平衡是绝对的、普遍的、永恒的和全局的。系统一旦离开平衡态,就处于非平衡态。非平衡态又分为近平衡态与远离平衡态。

近平衡态是指与平衡态只有微小距离的状态。在近平衡态下,系统的主要运动趋势是走向平衡。这就需要研究一些在研究平衡态时未曾考虑过的过程。首先,近平衡系统在引起非平衡的扰动被消除后就会自发地回到平衡态。这种过程称为弛豫过程,弛豫过程所经历的时间称为弛豫时间。其次,要使系统始终处于非平衡状态,就需要外界条件即“力”(如温度差,电位差,浓度差……)来强行维持,就会引起持续不断的“流”(如热流,电流,粒子流……)。这种过程称为输运过程。输运过程伴随着一定的能量消耗,因而也是耗散过程。第三,宏观的平衡态对应着瞬息万变的微观运动,是微观运动的一种平均的表现。因此各种宏观参数总是在平均值附近上下摆动,这称为涨落过程。

弛豫、输运与涨落是近平衡区的主要的非平衡过程,而这些过程都服从于走向平衡这一总的趋势,因此有深刻的内在联系,由一些共同的规律相互联系起来。其中最主要的是输运系数对称原理和涨落耗散定理。输运系数对称原理是说,在近平衡区,由力 X_i 产生流 J_k 的输运系数 L_{ki} 与由力 X_k 产生流 J_i 的输运系数 L_{ik} 是相等的,即是说,在 $J_k = \sum_i L_{ki} X_i$ 中,各系数 L_{ki} 的矩阵是对称的;

$$L_{ki} = L_{ik}$$

这个关系通常也叫作昂萨格倒易关系。

涨落耗散定理是说,输运系数由相应物理量的涨落平均值决定,或者说其涨落与输运(耗散)系数成比例。

此外,最小熵产生原理指出,线性非平衡区的系统随着时间的推移,总是朝着熵产生减少的方向进行,而定态的熵产生取极小值。

关于近平衡态的这些理论能否推广到离平衡较远的状态,这个问题上人们遇到了严重的困难。当延长系统同平衡态的“距离”时,各种物理过程的个性表现得过份突出,难以建立普遍的理论。但是,人们却惊奇地发现,在远离平衡的情况下,反而出现一些带有普遍性的现象。许多系统在远离平衡情况下突然进入新的更有序的状态,形成所谓耗散结构。下面将会看到耗散结构的产生可以用非平衡相变来说明。

3. 平衡相变与非平衡相变

(1) 平衡相变

系统在平衡状态下发生的相变,称为平衡相变。例如,在平衡状态下,气、液、固三态的转变,铁磁体和顺磁体的转变,金属

的超导转变等,均属于平衡相变。

平衡相变,根据表征相变的是化学势的一阶偏导数还是二阶偏导数,区分为一级相变和二级相变。

常见的气、液、固三相的相互转变是一级相变。在一级相变中,物质的化学势(μ)不变,但化学势的一阶偏导数所代表的物性(如比容 v , 摩尔熵 S)发生突变。其热力学关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= \mu_1 \\ v_2 &\neq v_1, \left(\text{即 } \frac{\partial \mu_2}{\partial P} \neq \frac{\partial \mu_1}{\partial P} \right) \\ S_2 &\neq S_1, \left(\text{即 } \frac{\partial \mu_2}{\partial T} \neq \frac{\partial \mu_1}{\partial T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

一级相变中有相变潜热 L 的吸收或释放, 即

$$L = T(S_2 - S_1).$$

并且,化学势的一阶偏导数在临界点(相变点)是不连续的。即说,化学势 μ 的一阶偏导数 $\partial\mu/\partial P$ 及 $\partial\mu/\partial T$ 在临界点前后取不同的值。

但是在超导、超流、铁磁、铁电等相变中,情况就不同。在这类相变中,物质的化学势不变,化学势的一阶偏导数也不变,但化学势的二阶偏导数所代表的物性(如比热容,膨胀系数 α 和压缩系数 k)发生突变,因此称为二级相变。其热力学关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= \mu_1 \\ v_2 &= v_1 \\ S_2 &= S_1, \text{ 即 } \frac{\partial \mu_2}{\partial T} = \frac{\partial \mu_1}{\partial T} \\ C_{p,2} &\neq C_{p,1}, \text{ 即 } \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial T^2} \neq \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial T^2} \\ \alpha_2 &\neq \alpha_1, \text{ 即 } \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial T \partial P} \neq \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial T \partial P} \\ k_2 &\neq k_1, \text{ 即 } \frac{\partial^2 \mu_2}{\partial P^2} \neq \frac{\partial^2 \mu_1}{\partial P^2} \end{aligned} \right\} \quad (5.15)$$

二级相变中没有潜热的吸收或释放(因 $S_2 = S_1$); 并且化学势的二阶偏导数在临界点是不连续的, 即是说二阶偏导数 $\partial^2 \mu / \partial T^2$, $\partial^2 \mu / \partial T \partial P$ 及 $\partial^2 \mu / \partial P^2$ 在临界点不连续。

一级相变和二级相变既有共同点又有一些区别。两者的共同点是: 不论一级相变还是二级相变, 都是物质结构有序度的一种改变, 都是质变现象。它们都有一个临界点 T_c , 在 T_c 以下序参量不为零; 当 $T \rightarrow T_c$ 时序参量趋于零; 在临界点 T_c 处, 发生跃变式的对称的破坏。

这两种相变的主要区别在于: 首先, 一级相变是物态的突变, 如水变成汽, 而二级相变是同一物态中对称结构的突变, 如铁磁体变为顺磁体。一级相变点是两相化学势 μ_1 与 μ_2 相等的点, 可能出现过热或过冷现象, 但二级相变点是热力学的某种奇点, 特别是热力势(吉布斯函数)的奇点, 不可能有过热或过冷现象。其次, 相变根据在临界点处系统的熵是否连续, 区分为连续相变和不连续相变。从式(5.14)和(5.15)得知, 一级相变属于不连续相变, 而二级相变属于连续相变。在一级相变中, 有序结构的建立(或破坏)是突然发生的, 所以在相变过程中需要释放(或吸收)潜热。但在二级相变中, 系统结构的变化是逐渐地连续地发生的, 因此在相变点没有吸收或释放潜热的现象。但在二级相变中, 随着温度升高(或下降), 有序结构破坏(或建立)的速度也越来越快, 因而到了相变点, 热容量发生突变。

(2) 非平衡相变

我们在本章第二节看到了在连续介质力学、物理学、化学、生态学等领域里发生的各种无序-有序转变, 有序-有序转变或有序-混沌转变的实例。这些现象都是在非平衡状态下发生的。

但是这些转变与上面谈到的平衡相变有许多相似之处。

例如，以图 5.17 为例。其中，当 $\alpha > 0$ 时只有一个稳定点 $q = 0$ ，而当 $\alpha < 0$ 时有两个稳定点，而 $q = 0$ 的点变为不稳定的。即是说，当我们将 α 从正值逐渐改变至负值时，在 $\alpha = 0$ 时，原来的稳定平衡位置 $q = 0$ 变为不稳定的。这一现象被称为对称破缺不稳定性。又，当我们将势曲线变形，从 $\alpha > 0$ 变为 $\alpha < 0$ ，它在 $q = 0$ 附近变得越来越平坦，因而粒子沿势曲线落下的速度变得越来越慢，这一现象称为临界慢化。当势函数曲线变得越来越平坦时，粒子的运动范围变为越来越大，这是由于在临界点附近涨落变得特别大，这时的涨落称为临界涨落。这表明，非平衡系统在关节点发生质变时，有很多现象（即临界慢化，临界涨落，对称破缺等）显示出与平衡相变中的一级相变或二级相变的相似性。于是，人们把非平衡系统中的这些质变现象统称为非平衡相变。

当然，非平衡相变与平衡相变有着一些根本性的区别。例如，非平衡相变包括振荡、空间结构和混沌。平衡相变通常是在热力学极限下研究的，其中样本体积被取为无穷大，而在大多数非平衡相变中样本的几何性质起着决定性作用，并导致相当不同的结构。

下面，我们从与平衡相变的比较中指出非平衡相变的一些共同特征。

(i) 非平衡相变只能在远离平衡的非平衡区发生，不可能在近平衡的非平衡区发生，而平衡相变是在平衡状态下发生的。

(ii) 与平衡相变一样，非平衡相变也是在某个参数达到一定临界值时才突然发生的。其无序-有序突变的性质，与平衡态

二级相变相似。例如激光形成时光波的相位和频率的突变有序，就与二级相变中顺磁分子磁矩在临界点即居里点处产生宏观磁矩的有序突变相似。

(iii) 非平衡相变是在同一物态中的相转变，而不涉及物态之间的相转变，当然也就没有物态转变时出现的潜热的释放和吸收。在这一点上，非平衡相变与二级相变雷同，与一级相变不同。

(iv) 非平衡相变的结果是在远离平衡的非线性非平衡状态中形成稳定有序的动态结构，即所谓耗散结构。这种结构有和平衡结构类似的稳定性，不会因外界条件的微小改变而消失。但是为了维持这种结构的稳定，必须随时有外界物能的补充。如果不能充分地供给外界的物能，耗散结构立刻就瓦解。也就是说，耗散结构是在不断的物能流中才能持续存在。这与平衡相变的情况完全不同。平衡相变后的新结构(或晶体)不需要由物能流来维持其稳定。耗散结构是“活”的结构，平衡结构是“死”的结构。

第四节 系统进化的机制

一、自组织的途径

我们在以上的讨论中，从很多经验事实中表现出来的分歧和相变现象中已经看到：一个系统在没有外界关于系统内部模式的任何现成信息输入的情况下，通过适当的物能流，可以自发地形成某种时间模式、空间模式或时空模式。这种现象通常称

为自组织。显然，系统的自组织也就是系统内部各要素的排列次序的变化，而这里的变化包括从无序到有序、从一种有序到另一种有序、从有序到混沌的变化。

关于系统自组织现象有两种基本的研究方法，其一是外部考察法，即以控制参量的变化来说明自组织；其二是内部考察法，即以系统内部诸要素的质与量的变化来说明自组织。

1. 控制参量的变化引起自组织

前面已在多处讨论过这一途径。我们可以区分控制参量缓慢变化的情况和突然变化的情况。

当我们缓慢改变周围环境对系统的作用时，也就是当我们逐步改变系统的控制参量时，如果这种变化达到一定程度，系统就处于发生质变的关节点即临界点上。系统在临界点从旧态转变为新态。尤为引人注意的是，在转变点上，外界对系统的作用并未改变，但系统却发生了质变。并且，如前所述，环境提供给系统的物能并不是有序的固定量，而是无规的，但系统却能“创造”出某种有序结构。

在另一些情况下，当系统从一个无序状态向另一个无需规定或甚至不存在的终态过渡时，控制参量的突然变化可能以自组织的方式形成某种有序结构或模式。

这种情形可用状态向量

$$q(x, t) = u(t)v(x)$$

来说明。其中 $v(x)$ 表示空间有序，序参量方程为

$$\dot{u} = \lambda u$$

当我们迅速改变控制参量 α ，使得 $\lambda < 0$ 很快变为 $\lambda > 0$ 时，就出现瞬变状态向量

$$q(x, t) = e^{at} v(x)$$

它显然表示一种结构,但它并不趋于一个新的稳态。

这种自组织方式有助于我们探讨把宇宙生命包括在内的各种结构的进化。从大爆炸的那一瞬间起,宇宙就处在瞬变状态中,并且在不断膨胀,由此出现了各种有序结构。

2. 系统要素的质与量的变化引起自组织

我们可以区分下列几种情况:

(1) 要素质的变化引起自组织。两个系统只要各自所含要素有质的区别,就构成两种不同质的系统。因此当一个系统的要素发生质变时,系统本身也要发生质变,而在一定条件下就要出现自组织现象。系统要素的质变,一方面可能是由于系统的开放性,就是说一部分要素会离开系统,而某些新要素进入系统,这就会从整体上改变系统要素的质的构成;另一方面可能是由于诸要素内部的原因,即是说任何系统的任何要素由于内部矛盾终究要转化为另一种东西。

(2) 要素数目的变化引起自组织。要素数目的变化会在宏观层次上产生全新的系统行为,这已是众所周知的事实。这里我们所要强调的是,要素数目的增加为所出现的自组织模式数目的增加提供可能性。例如在图 5.29 中,当要素 e 的数目为 2 时,只能有一种模式;当要素数目为 3 时,能有 2 种模式,而当要素数目增加到 4 时,模式数目就增加到 4。可见,随着要素数目的增加,不同形状图形数就急剧增加。

(3) 要素运动量的变化引起自组织。例如,固体受热而变成液体,液体受热而变成气体。物态的这种转变,从微观上看,是与系统内部分子的运动量的大小有关的。一般地说,系统内

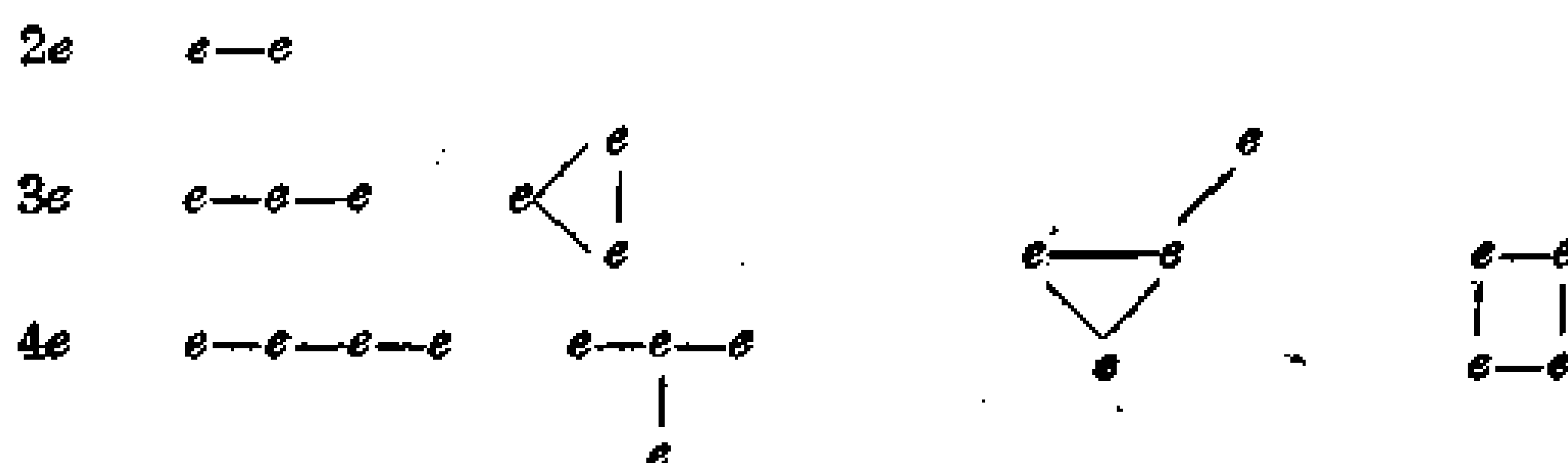


图5.29 要素数目与自组织模式

诸要素的运动量的变化达到一定程度就会改变这些要素的原有排列次序,并在一定条件下引起自组织。

(4) 要素排列次序的变化引起自组织。即使在上述各因素都不变的情况下,各要素排列次序的变化也作为一个独立过程导致自组织,而一个系统不管以何种方式进行自组织,将都要经历要素排列次序的变化。

在现实的系统进化中,上述几种自组织方式通常相互交织而规定着整个自组织过程。

二、系统的进化序列

在各门具体科学中,人们对许许多多的具体系统的进化序列已有了不少研究。例如,生物进化论者已经清楚地揭示了生物系统由简单到复杂的进化序列。在本章第一节所考察的那些典型现象中,可以清楚地看到各种系统从简单到复杂的进化序列。

在系统科学领域,保尔丁与贝塔朗菲曾以较抽象的系统语言考察过现实系统进化的等级序列。在他们看来,人们所研究的对象世界可分为下列几个等级:(1)静态结构,如原子、分子、晶体的结构;(2)时钟机构,如钟表、一般机器和太阳系;(3)控制机构,如恒温装置、伺服机构;(4)开放系统,如火焰、细胞;(5)低

级生物体；(6)动物；(7)人；(8)社会文化系统；(9)符号系统。显然，这几个等级也就意味着他们所设想的现实系统的进化序列。

上述各种具体系统的进化序列中有一个共同的特征，那就是：不管我们所研究的是什么系统，它们都有一个由简单到复杂的进化过程，这个过程可分成若干个阶段，而这些阶段的有序排列就形成其进化序列。实际上这就是一般系统的进化序列。

为阐述一般系统的进化序列需要一种有别于具体科学的更一般的语言。这种语言我们可以取自哲学和数学。从前几节的讨论中，我们不难知道：

系统进化的一般过程，是由简单到复杂的过程，相反的过程被看作是这一总的一般过程的副产品。

系统进化的一般序列，是由无序到有序、由简单有序模式到复杂有序模式、由有序到混沌的宏观转变。到目前为止，所研究的最简单的有序模式是不动点，而最复杂的模式是混沌吸引子。因此，我们要在这里讨论的就是从不动点到混沌吸引子的进化序列，其中最典型的是从不动点到极限环，从极限环到环面，再从低维环面到高维环面或混沌吸引子的转变。^①

不同类型的系统有其不同的走向混沌的进化序列，而不同类型混沌的发生机制也互不相同。

下面，我们将基于控制参量的变化来考察系统进化序列。系统在它的控制参量发生变化时可能经历几次不稳定性。每次的不稳定性产生的模式有各种各样。如果只考虑时间模式，我们

① 系统的进化表现为从一种吸引子向另一种吸引子的转变，或一种吸引子从低维向高维的转变。显然，这种转变也就意味着系统宏观模式的转变即不稳定性。因此系统进化序列亦可称为不稳定性序列。

可能发现与时间无关的许多状态,如周期运动、准周期运动、混沌以及这些运动状态之间的各种转变。这些转变是在引起锁频或倍周期(次谐波)等现象的不稳定点上出现的。当然,某一类系统可能有其特定的转变序列。人们常把这种序列称为“道路”。

走向混沌(或湍流)的道路最早提出出来的是所谓朗道-霍卜夫道路。他们把一些系统例如流体走向混沌的典型道路描述如下:当雷诺数^① R 很小时,流体处于和时间无关的层流状态,对应于相空间中的不动点。当 R 达到第一个临界值 R_{c1} 时,不动点失稳,分歧为极限环,即出现频率为 ω_1 的振荡状态。这就是霍卜夫分歧。 R 继续增大,极限环又失稳,突然出现另一新频率 ω_2 ,系统在两个基频上振荡,即极限环分歧为二维环面。朗道设想,这种分歧相继发生,系统向越来越高维的环面发展。在每一步,新频率 ω_i 被添加到原有基频集合上去。当基频 ω 的数达到无穷大时,就出现湍流。即是说,湍流被看作是无穷维环面上的运动。

但是,目前的理论和实验都已基本上否定了朗道的设想。目前人们所承认的走向混沌的道路有茹勒-塔肯斯道路、倍周期分歧道路和阵发混沌道路。

1. 茹勒-塔肯斯道路

茹勒和塔肯斯认为,根本不必出现无穷多个不可约的频率,只要四次分歧就可以产生湍流,即他们所提出的进化序列是:不动点→极限环→二维环面→三维环面→奇怪吸引子(湍流)。后来,他们又指出,达到二维环面后,下一步的分歧不必达到三维环面,

① 所谓雷诺数,是用来比较粘滞流体流动状态的一个无量纲的数。雷诺数 $R = \rho l v / \eta$, 其中 ρ , η , v 分别表示流体的密度、粘滞系数和流速, l 为流体与之相对流动的物体的线度(如机翼宽度,圆管直径等)。

即三个基频上的准周期运动,就直接失稳而转变为奇怪吸引子。

这个道路与最近几年流体中的实验观测相一致,但是关于突变点附近的“临界”行为的研究尚有待深入。

又一很重要的问题是,茹勒和塔肯斯设定各频率是接近于有理数的。而茹勒-塔肯斯道路能解释一些现象,不能解释另一些现象。实验表明,二维环面既可转变为混沌,又可转变为三维环面。这样,哈肯认为,如果诸频率具有彼此之间的某种无理数性,从二维环面到三维环面的分歧是完全可以发生的。因此,为决定一个实际系统是否发生这种转变,必须进行概率论证。对于一个给定的系统来说,可能存在控制参量或其他参量的一些区域,在这些区域中低维环面可以相继地转变为高维环面。但是随着环面维数的增高,这种转变变得越来越不可见,因此在高维情况下最可能出现的是混沌。也就是说,在这种情况下朗道-霍卜夫道路失去其有效性。

2. 倍周期分歧道路

这是目前研究得最细致的一条通向湍流的道路。从物理上看,朗道-霍卜夫道路中未考虑的锁频现象起着重要作用。在一些实验中,流体中出现的两个不可约的频率可以锁频到其中之一,那么相应的极限环就可以沿着最终要导致混沌的倍周期序列发生进化。按照哈肯的解释,在这种情况下,系统由少数几个序参量控制,而倍周期序列就在相应序参量的低维空间上发生,其维数至少是三。对于耦合的振子系统而言,非线性振子在相当弱的耦合下就可锁频到线性振子的基频或分频上,随之展现倍周期分歧序列。

倍周期分歧序列可用离散映象来描述,也可用微分方程(如

前面已述的杜芬方程) 来描述。这里我们粗略地看一下离散映象。一维迭代过程

$$x_{n+1} = f(\alpha, x_n) \quad (5.16)$$

表示非线性离散映象, 其中 f 是 x_n 的非线性函数, 它依赖于参数 α 。现已知道, 很大一类非线性映象在通过倍周期分歧序列进入混沌的时候, 遵循着同样的规律, 受到同一个数值即所谓费根鲍姆数的支配。这就是所谓单峰映象: 函数 $f(\alpha, x)$ 在区间 I 上仅有一个最大值 $f_{\max} = f(\alpha, x_0)$, 最大值附近可展开为

$$f(\alpha, x) = f_{\max} - a(x - x_0)^2 + \dots \quad (5.17)$$

其他地方只要分段光滑即可。单峰映象的许多性质与函数 $f(\alpha, x)$ 的具体形式无关。当 $z = 2$ 时, 就发现有趣的现象: 随着 α 的增大, 方程 5.17 先是只有一个周期 1 的定常解; 当 α 增大到 α_1 时, 周期 1 的定常解分歧为两个周期 2 的定常解; 当 α 增大到 α_2 时, 周期 2 的定常解分歧为四个周期 4 的定常解……; 当 α 增大到 α_m 时, 周期 2^{m-1} 的定常解分歧为 2^m 个周期 2^m 的定常解……。照此下去, 当 α 增大到 α_∞ 时, 最终出现混沌。这就是倍周期分歧序列, 如图 5.30 所示。惊人的成果是, 当 m 趋向无

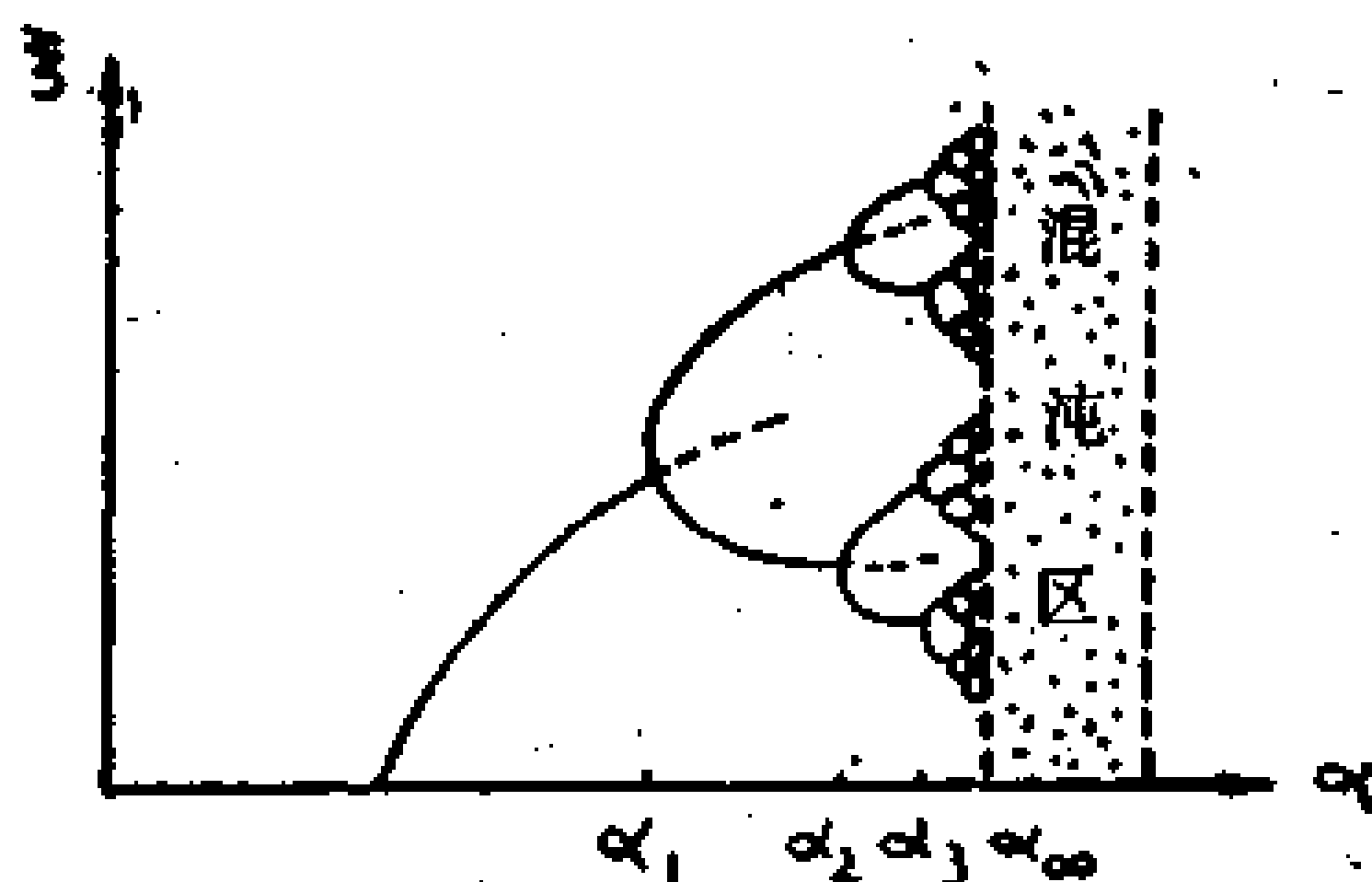


图5.30 倍周期分歧现象

穷大时,倍周期分歧中的间距比值

$$\delta_m = \frac{a_m - a_{m-1}}{a_{m+1} - a_m} \quad (5.18)$$

总是趋于一个确定值, 即

$$\begin{aligned} \delta &= \lim_{m \rightarrow \infty} \delta_m = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{a_m - a_{m-1}}{a_{m+1} - a_m} \\ &= 4.6692016091029509 \dots \end{aligned} \quad (5.19)$$

如果取一个简单的迭代函数

$$f(x) = ax(1-x), \quad (5.20)$$

为例,倍周期分歧序列中的间距比值 δ_m 的变化情况如表 5.1 所示。

表 5.1 费根鲍姆数的出现

m	分歧情况	分歧值 a_m	间距比值 δ_m
1	1 分为 2	3	
2	2 分为 4	3.449489743	4.751466
3	4 分为 8	3.544090359	4.656251
4	8 分为 16	3.564407266	4.668242
5	16 分为 32	3.568759420	4.66874
6	32 分为 64	3.569691610	4.6691
⋮	⋮	⋮	⋮
∞	周期解→混沌	3.569945972	4.669201609

倍周期分歧序列所表现出的普适的分歧结构和数学特性已在非线性电路等实验中得到定量证实。

3. 阵发混沌道路

阵发混沌与倍周期分歧是孪生现象, 凡是观察到倍周期分歧的系统, 原则上均应有阵发混沌。可以用“迭代映象”为阵发

混沌提供模型。作为一维离散映象的一例,我们看所谓“逻辑斯谛映象”:

$$x_{n+1} = \alpha x_n(1 - x_n) \quad (5.21)$$

现以 $n+1$ 取代式中的 n ,得

$$x_{n+2} = \alpha x_{n+1}(1 - x_{n+1}) \quad (5.22)$$

然后,按式 5.21,以 x_n 取代 x_{n+1} ,得

$$x_{n+2} = \alpha^2 x_n(1 - x_n)(1 - \alpha x_n(1 - x_n)) \quad (5.23)$$

因式 5.21 所示的映象用了两次,将式 5.23 简记为

$$x_{n+2} = f^{(2)}(x_n) \quad (5.24)$$

再以 $n+1$ 取代 n ,并用上式 5.21,便得

$$x_{n+3} = f^{(3)}(x_n) \quad (5.25)$$

对于控制参量 α 的一个特定值,映象 5.21 可示如图 5.31。

图 5.32 表示图 5.31 中小方框。

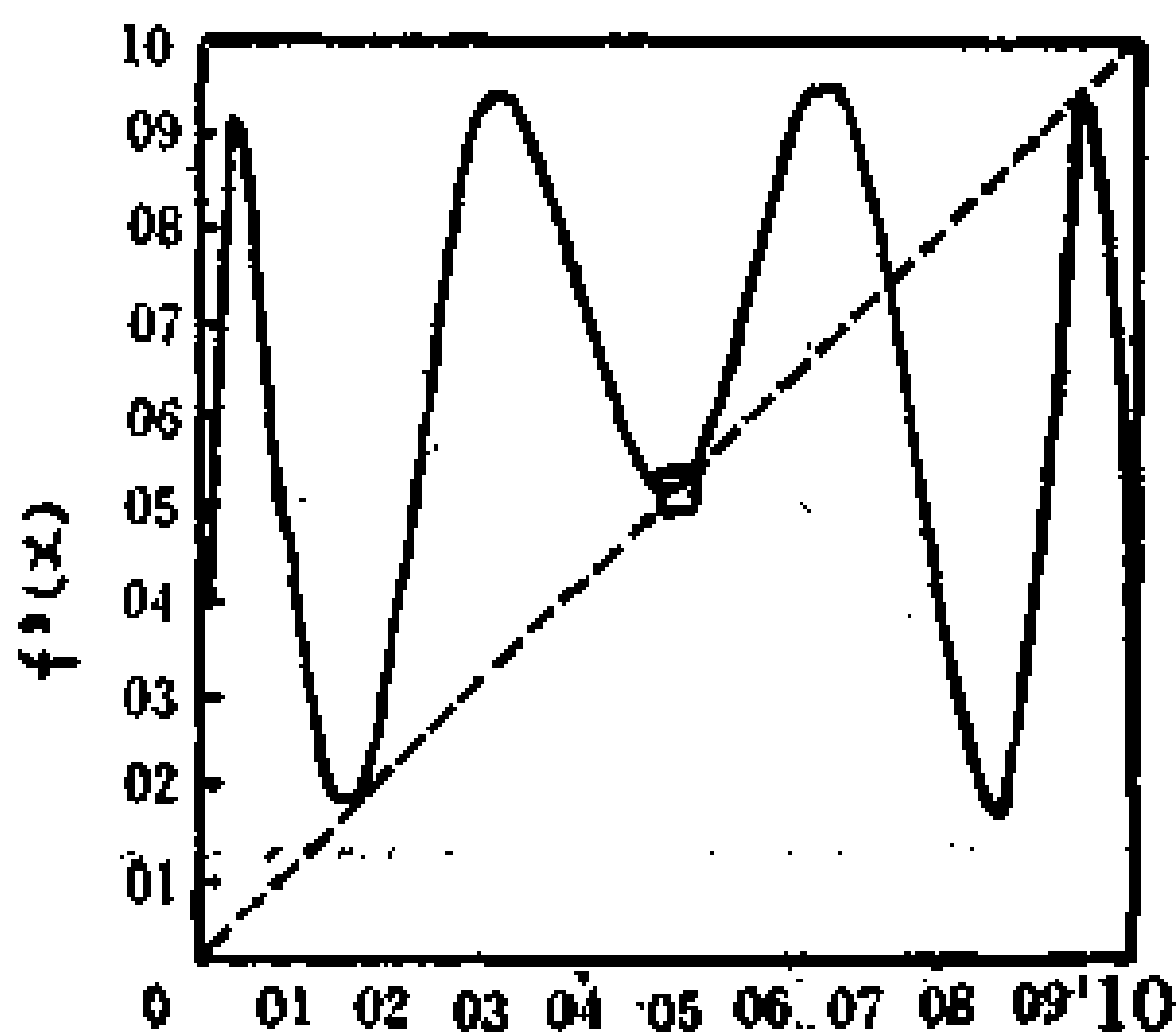


图 5.31 映象 $f^2(x) = f^{(2)}(x)$
(对于一个特定参量值)

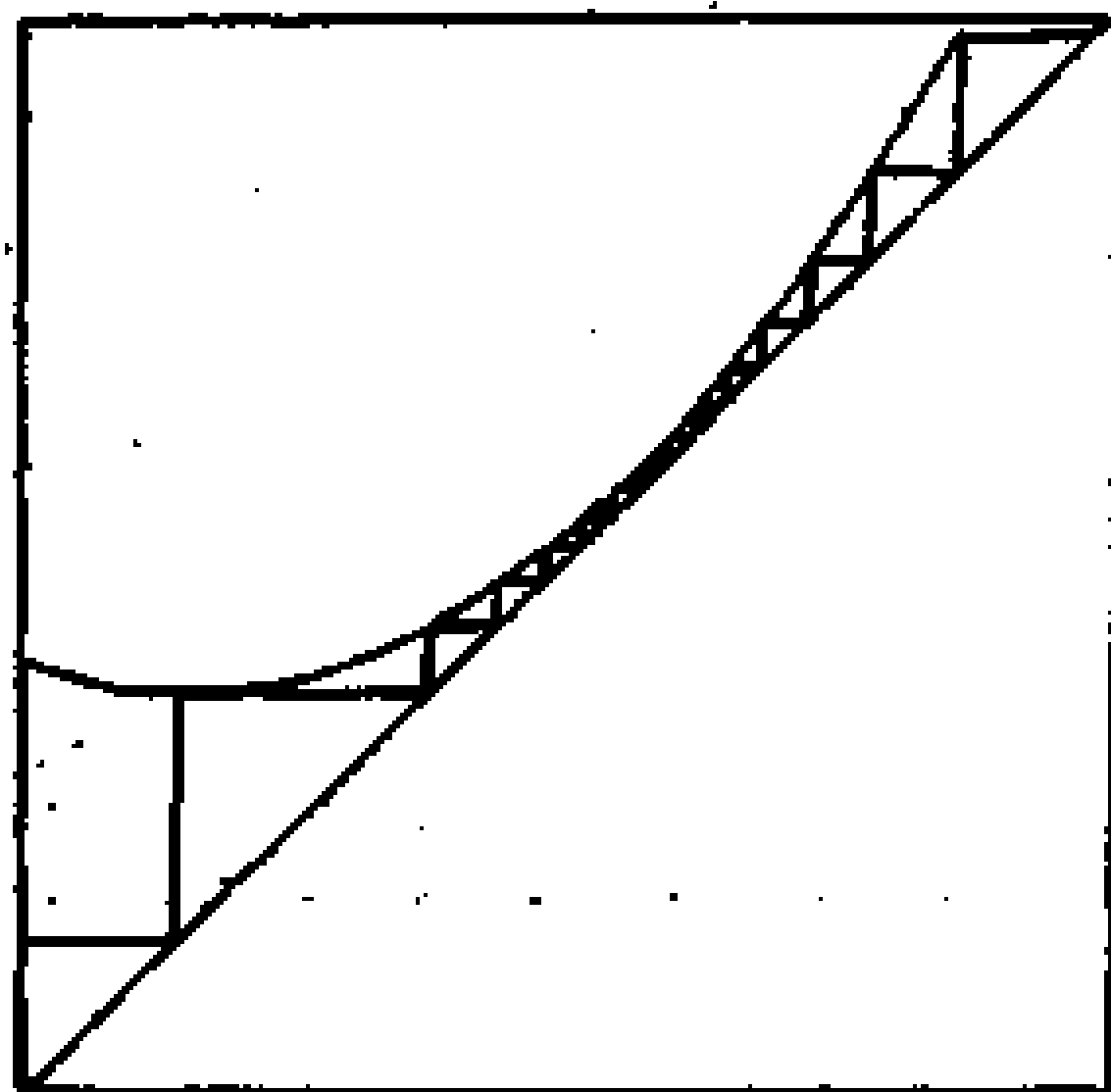


图 5.32 阵发混沌发生机制

由图 5.31 可知, $f^2(x)$ 的曲线与 45° 分角线之间有三处狭窄的“隧道”。当迭代中一个点落在某个“隧道”附近时,就发生图

5.32 所示的过程。点 x_n 在隧道中迭代多次后，最终从另一端离去，并随之进行一些大幅度跳跃，这就意味着发生了混沌运动。经过一些时间后，点 x_n 又可能来到这个或另一个隧道附近，再次重复以上过程，然而每次都不是准确地重蹈旧辙。这样，隧道中的迭代很象是在不动点附近踏步，对应于“层流”或近乎周期的运动。不同隧道之间的跳跃，对应于“湍流”。这就说明，为什么整个迭代过程看起来就象是周期运动中随机地夹杂了一些混沌阶段，“层流”时而被阵发的“湍流”打断。隧道越狭窄，“层流”时间即通过隧道所需时间也越长。当峰或谷与分角线相接触时，层流时间趋向无穷大，即达到完全的周期状态。这个过程倒过来看，“层流”时间随着谷或峰偏离分角线而愈来愈短，终于完全成为“湍流”状态。这就是从有序（周期运动）到混沌的阵发道路。

总之，阵发混沌表现为系统的时间行为忽而周期，忽而混乱，随机地在两者之间跳跃。

以上，我们简要地考察了走向混沌的几种道路。可以肯定，走向混沌的道路将不只限于这几种。随着实验和理论研究的深入，将会有更多的道路通向混沌。

三、系统进化的因素

生物进化论者在研究生物进化时认为，突变、自然选择与隔离是生物进化的因素。同样，我们可以认为系统进化的因素是涨落、环境选择与隔离。

1. 涨落

涨落亦称“起伏”。由于种种原因，系统的输入值和输出值

通常与其正常值有些偏离，系统要素在其结构中的位置也会有所偏离。一般地说，表征系统某种性质的量度，在任一瞬时的值与其长时间内的平均值有某种偏离，这种现象统称为涨落现象。例如，商品价值围绕其价值的波动，热动平衡系统中气体密度分布的瞬时不均匀，电子管和无线电线路中由于电子的无规则热运动而造成的涨落电流，生物进化中的突变，等等。有时称引起涨落现象的各种作用为涨落（或涨落力），涨落大小称为涨落值（或涨落）。

涨落的较严格定义是：设一个系统在某一瞬时 t 的某一量度的值 x ，与该量度的平均值 $\bar{x}$ 的差为 $x - \bar{x}$ 。这时，差值 $x - \bar{x}$ 的平方的平均值 $\overline{(x - \bar{x})^2}$ ，称为散差。而散差的平方根

$$\sqrt{\overline{(x - \bar{x})^2}} = \sqrt{\overline{(\Delta x)^2}} = [\bar{x^2} - (\bar{x})^2]^{1/2} \quad (5.26)$$

称为涨落值。

对于一个系统来说，其涨落既可来自内部亦可来自外部，涨落是不可避免的，又是随机的。

在整个系统进化过程中涨落是系统进化的最基本的先决条件，没有涨落就不可能发生进化。在系统进化中，涨落先是使系统离开稳定点进入不稳定点，然后促使系统离开不稳定点进入新的稳定点。例如，在图 5.33 中，如果一个不活动的系统起初处于 $q = 0$ ，则它将永远处于这一点。但是涨落是不可避免的，它驱使系统发生不稳定性，也就是使系统通过分歧或相变形成新的宏观模式。于是系统处于某一新状态 $q^{(1)}$ 。这时，涨落又驱使系统去探索新的状态。如无涨落，系统绝不会“知道”在 $q = q^{(2)}$ 处还有一个更稳定的状态。但是涨落能够使系统通过某种自组织过程，从 $q^{(1)}$ 进化到 $q^{(2)}$ 。显然，在这种情况下，系

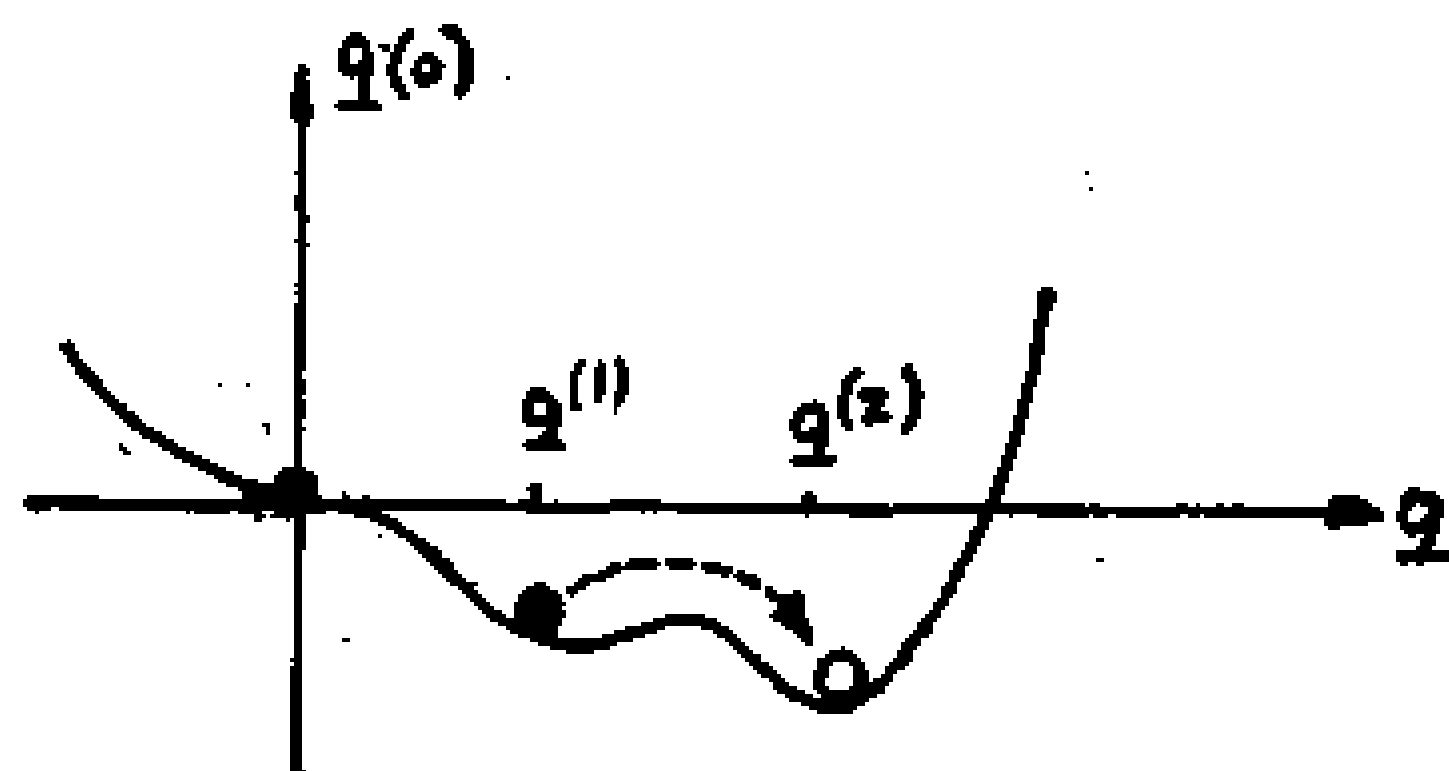


图 5.33 涨落与进化

统在 $q^{(2)}$ 处更适应于它的环境。

涨落在系统的平衡态、近平衡态或远离平衡态中所起的作用并不相同。首先,当系统处于平衡态时,热力学量的涨落依从高斯分布,平衡态不会被涨落破坏。但是即使在平衡态的情况下,涨落还是能使系统发生相变,从一种宏观模式转变为另一种宏观模式。

其次,当系统处于线性非平衡态时,涨落起着破坏系统稳定性的作用,要使系统偏离定态。但是系统以自己的情力抵抗涨落所造成的偏离,结果使涨落不断衰减,最后回归到原来的平衡态。

最后,在远离平衡的非线性非平衡区,在不稳定点附近涨落有很大的反常,即随机的小涨落通过相干效应不断增大成巨涨落,使系统由不稳定态跳跃到一个新的稳定有序状态。这时,这种涨落乃是形成新结构的触发器。在新的稳定态中,涨落将重复上面所说的各种作用。

2. 环境选择

虽然涨落是系统进化的触发器,但是仅用涨落还是不能解释系统的进化。涨落提供系统进化的材料,而进化是通过环境

选择进行的，环境选择决定系统进化的方向。一般地说，由于涨落的随机性，在复杂系统中涨落可以产生多个宏观有序结构，而在特定环境下它们的稳定性和适应性是各不相同的，因而不同的有序结构之间发生激烈的竞争，其结果或者是最适应于环境的一种结构幸存下来，或者是它们彼此稳定地共存。例如，在贝洛索夫——扎包廷斯基反应中不同的稳定模式可以并存，在某种环境下捕食者与被捕食者也可以共存。因此在系统进化中，如同在生物进化中一样，有利于适应的涨落被保存，不利于适应的涨落被淘汰；系统在涨落和环境选择的相互作用下实现进化。

这里，说明环境选择在系统进化中所起作用的很有说服力的一个例子是生物大分子在我们周围自然界中的进化^①。氨基酸分子有两种异构物，一种是L型，另一种是D型。在一般情况下，实验室里合成出来的氨基酸是这两种异构物的混合物；两者的比例为1:1。L型氨基酸形成右手螺旋肽，D型氨基酸形成左手螺旋肽。如果在右手螺旋肽中加入D型氨基酸，就会破坏右手螺旋肽的稳定构象。然而人们在十九世纪已发现地球上的生物体只含有一种异构物。例如所有蛋白质都是由L型氨基酸所组成，不含任何D型氨基酸。在酶催化反应中，由于酶分子都是由L型氨基酸所组成，反应产物都是L型异构物。甚至还有一种特殊的酶即D氨基酸氧化酶，它的作用是专门破坏D型氨基酸，以维持生物体内旋光性质的纯度。这说明氨基酸分子的不对称性导致蛋白质分子螺旋肽的不对称性，而后者的不对称性反过来

① 参看周国城、陈念貽：《量子生物学中的若干问题》，《化学通报》1978年第5期。

加强前者不对称性的纯度，结果导致了生物大分子不对称性的放大和变纯。因此在生物大分子的漫长的进化过程中，只要一开始是L型氨基酸占优势，则生物体内的氨基酸都成为L型的。于是，所要解决的问题是L型氨基酸最初如何占了优势。

我们现在可以说这是环境选择的结果。当人们用“左手”电子雨和“右手”电子雨来轰击消旋的亮氨酸晶体时，在前者的情况下晶体的D型氨基酸破坏较多，在后者的情况下L型亮氨酸破坏较多，其差额约为1%。而我们从李政道、杨振宁关于在弱相互作用中宇称不守恒的理论可以知道，在我们周围自然界的 β 衰变中，电子的发射是不对称的，“左手”电子对于“右手”电子占优势。因此在这样的环境中，L型氨基酸被选择并占优势是理所当然的。当有人设想在一个反物质的世界里，生物大分子很可能是由D型氨基酸组成的时候，我们也就不能简单地否定其中的合理性。

3. 隔离

隔离在系统进化中也起着重要作用。在系统的自组织过程中，一个模式与另一个模式的分离，一种模式同另一种模式的分离都通过隔离机制实现。在我们熟知的贝纳德现象中，当六边形花纹已形成时，液体的流动在六边形中心是由下朝上，在周边则是由上朝下。正是周边的这种流把一个六边形同另一些六边形分离开来。在贝洛索夫——扎包廷斯基反应中，宏观波形图样表明两个波在什么地方相碰，它们就消失在那个地方，而不同模式的共存是通过隔离机制实现的。由于环境隔离，在不同环境中可以产生和存在其他环境中所没有的系统类型。据迄今为止的资料，生命仅仅是地球的特有，其他星球还无法享受

这一荣誉；地球上的生命与L型氨基酸有关，而与D型氨基酸有关的生命被排斥到反物质世界中去了。结构隔离（指由于结构上的原因而造成的不同类型系统之间的隔离）具有特别重要的意义。在生物界里常见的生殖隔离是结构隔离的一个典型例子。在无机界中结构隔离更为明显。元素周期表中的不同元素可以看作是在漫长的物质进化中彼此隔离而形成的，在有些元素之间甚至已经消失了相互结合成化合物的可能性。地球表面上固体、液体和气体可以并存，它们决不会融合成含有无数微小气泡的糊状物。由于结构隔离，不同类型的系统即使共处于同一个环境，也不会丧失其独立性。总之，由于隔离机制起作用，不稳定性现象可以出现，系统进化可以持续，本来属于同一系综的不同系统可以分化成不同系综，不同类型的系统可以并存和独立发展。

第六章 系统控制与信息

经长期研究，人们已经发现各式各样的控制系统，不论是自动控制的机器，或是人体生命的调节系统、社会经济系统等，都是以信息的传递、反馈和控制为基础的。信息与控制直接影响着系统的行为，决定着系统目标的选择和实现，因此关于系统控制与信息的理论研究就成了系统科学的重要组成部分。

第一节 系统控制的思想 and 理论

一、系统的目的与行为

控制论与信息论的产生，是系统控制与信息的理论研究所取得的重要成果，也是人们对控制系统的认识趋于成熟的标志。

二十世纪中叶，在系统科学中，控制论的创始人维纳，首先将目的范畴引入了控制论，并把控制系统的活动看成是具有目的性的行为。“目的”这一概念，是一个在哲学家和自然科学家中长期争论的问题，以往“目的”被理解成是与人的活动、人的意识、人的自觉能动性联系在一起的。然而它被维纳引入控制论以后，就获得了新的解释。1943年，维纳和他的合作者罗森勃吕特、毕格罗共同发表的《行为、目的和目的论》一文，就是他们对

目的概念首次作出控制的解释的代表作。在这篇论文中，他们明确要达到两个主要目的，其中之一就是从控制论的角度，强调目的这一概念的重要性。在对科学史和哲学史上关于目的概念的争论充分了解的基础上，他们撇开了因果性问题，把目的论的研究仅限于目的自身的探索。因此他们在行为分类中，把“目的”理解为“由反馈来控制的目的”。若一个系统具有这类“目的”，它就是一个具有目的性的系统。

维纳从控制论的角度对目的概念的理解，使目的这一概念的外延拓宽了，它不再同以往所理解的那样，只与人的意识、人的能动性、人脑的活动直接相联系。它可以用来说明通过反馈来调节自己行为的生物系统的目的性，也可用来描述一般非生物系统类似人所具有的目的性行为。所以控制论中应用的“目的”概念，表明了一切控制系统活动的性质，是控制系统反馈调节效应的一种表述。

若一个复杂系统具有一定的层次性，而且每一层次都有各自的调节系统，通过它来控制各子系统的目的性行为，这就使得“目的”在复杂系统中也表现出了一定的层次性。对于这种复杂系统，由于环境和层次上的差异，使系统的目的和各子系统的目的也有所不同。从系统整体来看，它可能通过自身内部组织结构的变化，以适应环境的变化，从而达到确保其生存的目的。如：某个生物系统或某个企业管理系统都可能具有这种目的性。另外，它也可能不断利用某些因素，来达到系统的既定目的。它还可能利用某些因素，来抵制外来的干扰，保证系统的某种状态不变，以此作为自己的目的。从系统的不同层次看，就有可能处在高层次的系统，其目的性表现为力求与环境相适应，处在低

层次的子系统,则表现为有目的性的调节。

当然,系统的“目的”决非抽象或空洞的东西,它总是可以通过系统的活动而得到实现的。因此系统的目的与系统的行为是紧密相关的,可以说行为是系统目的得以实现的保证,目的是行为的向导,是行为最终结果的体现。正是基于这一点,维纳对控制系统的“行为与目的”进行了研究,其研究重点是客体(即系统)与环境之间的关系,而把客体的特定结构和内在组织略去不谈。这就是说,重点研究给定的任何一个相对地从环境中抽取出来的客体,研究该客体的输出对于输入的种种关系。所谓输出就是客体使环境产生某种变化。输入则是客体以外的任何一个事件以任何一种方式改变该客体,即环境对客体的影响和作用。由此就可导出“行为”的广义定义。所谓行为就是一个客体相对于它的环境做出的任何变化。这种变化要么主要是客体的一个输出,要么它可立即追溯到某一输入。因此我们可以说,一个客体的可以从外部探知的任何改变都可以称作行为。以上所述正是维纳等人在《行为、目的和目的论》一文中的思想,以及他们所给出的有关“行为”的定义。

为了对控制系统的行为作深入研究,维纳将“行为”进行了分类。首先,他将行为分为主动行为和被动行为两类。继而又将主动行为分为有目的的行为和无目的(随机)行为两类。有目的的行为是指那种可以解释为达到一定目标的行为。无目的的行为则是一种不被解释作趋向于某一个目标的行为。对控制论来说,更有意义的是对有目的行为的研究。所以维纳进而将有目的的行为分为反馈行为和非反馈行为两类,它们分别与后来控制理论中所阐述的某些控制方式相对应。因此对有目的行为的分类研究,

可以说是维纳控制论的一个重要思想和内容。

在控制系统中，一切具有反馈调节的行为都被看作控制系统有目的的行为。正是在这一点上，维纳看到了人、动物和自动机器的行为中都存在着这种共同特征。当然，深入一步考察也会发现，它们的目地性行为存在着明显的差异。尤其是人的实践活动，它是具有有意识的、自觉目的性的行为，是人脑预先想到其活动结果的一种行为。在这点上它与其他类型的控制系统相比较，维纳所看到的同一不是绝对的同一，而是包含着差异的同一。从它们的内部组织、结构及种种属性来看，都存在着显著的差别，只是在广义行为定义的基础上，它们才具有一致性。

维纳正是从这种一致性出发，研究了各种控制系统，它们需要采用哪些不同的控制方式才能保证其行为能达到合乎目的的效果。研究了信息的获取、传输、加工和使用，以及它对系统行为的影响和作用。研究了信息与控制的关系，以及如何利用信息运动来控制系统的目的性行为。从而他还创立了与传统模拟方法既有联系，又有根本区别的功能模拟方法，提出了有关控制论的一系列基本思想。维纳也就因此成了控制论的主要奠基人。他明确地将控制论定义为“关于在动物和机器中控制和通讯的科学”，突出了信息与控制在实现系统合乎目的的行为中的重要作用和地位。

二、控制系统的输入与输出——传递函数

1948年维纳《控制论》的公开发表，标志着控制论这门学科的诞生。它一诞生就显示出强大的生命力，在许多领域都得到

了应用,并取得辉煌成果。事隔几年,与其紧密相关的工程控制论首先创立起来,我国著名科学家钱学森于 1954 年在美国出版了《工程控制论》一书,这为工程控制论的创立,为控制理论的发展都作出了重要贡献。同时,控制论还渗透到了生物、医学、经济、社会等许多领域,并迅速创立了与其相关的一些新兴学科,如生物控制论、经济控制论等。自 1948 年以来,不到四十年的时间,控制论自身的发展也相当迅速,从经典控制理论发展到了现代控制理论,以至大系统理论。

经典控制论是控制理论处在初期发展阶段的理论,这一时期大约是本世纪四十到五十年代。该理论主要用于单输入单输出的线性常系数系统(或线性定常系统)。经典控制理论为了研究上的方便,常常把系统划分为许多控制环节,把一个实际过程、一个真实设备抽象为一个环节,撇开它们与控制无关的具体性质,着重突出它们在控制系统中的作用,尤其是在信息的传输和处理中的作用。在这里环节的特性指的是输入信号与输出信号之间的函数关系。当这种关系是一种稳态关系时,就称这一环节特性为静态特性,当这种关系是一种变动状态的关系时,就称为动态特性。显然,环节以及由环节组成的控制系统的动态特性,就更具有普遍的实际意义,因为它更能反映系统的真实状态。为此,控制理论就更加注重对各个环节和整个系统的动态特性的研究,以便使控制系统在变动中能更有效地发挥控制作用。

经典控制理论对线性定常系统动态特性的研究,常常采用传递函数来描述系统的输入和输出之间的关系。所谓传递函数就是在零初始条件下,输出量(或称响应函数)的拉普拉斯变换

$Y(s)$ ，与输入量（或称驱动函数）的拉普拉斯变换 $X(s)$ 之比，即

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

若用方框图表示，则为



传递函数的概念一般只适用于线性定常系统，然而它也可以扩充到一些非线性系统中去。在这里用传递函数来描述和表征系统的输出与输入之间的关系，正是维纳在研究系统行为与目的时所采用的基本思路，其重点也是研究客体的输出对于输入的种种关系。在他看来输出就是系统使环境产生某种变化，输入就是环境对系统的影响和作用。因此传递函数这一概念的建立和应用，可以说是采用广义行为定义来研究系统与环境之间关系，在控制理论中的具体化。而经典控制理论的独特之处也在于此，即它是建立在系统的输入和输出关系的基础上，是建立在传递函数的基础上的。它主要考虑的也只是系统的输入、输出和误差信号，控制系统的分析与设计也不外是使用传递函数及各种图解方法。

对系统动态特性一般是用传递函数来描述，当然也可用微分方程来描述，这种方法虽然具有定量准确和直观等优点，但需要进行复杂的微分方程求解工作，在实用上很不方便。所以人们通过拉普拉斯变换，将变量为时间 t 的微分方程，转换成以拉普拉斯算子 s 为变量的代数方程。例如：图 6.1 中所表示的两个系统，它们都可用下面二阶微分方程来描述，即

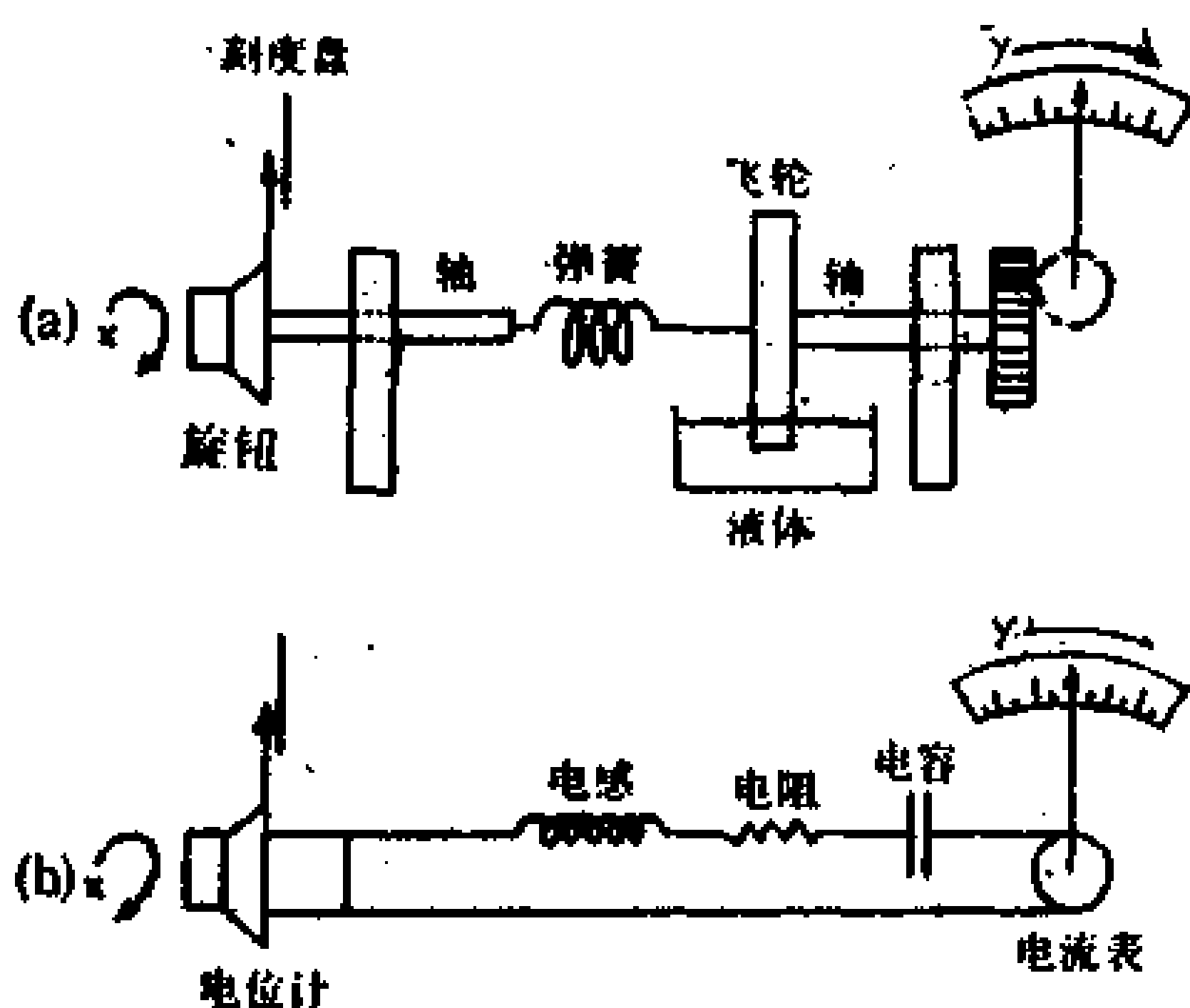


图 6.1 两个相似的系统
(a) 机械的; (b) 电学的

$$C_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + C_1 \frac{dy}{dt} + C_0 y = X$$

通过拉普拉斯变换, 上述二阶微分方程就转换成以算子 s 为变量的二次代数方程, 即

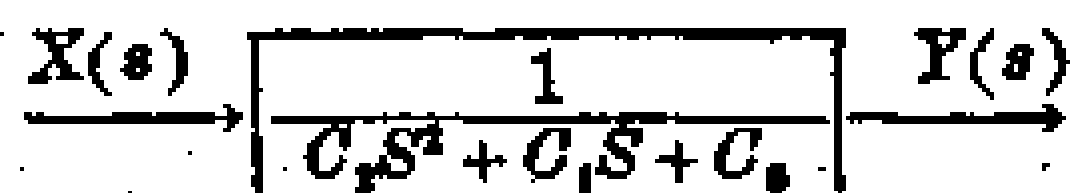
$$C_2 Y(s) \cdot S^2 + C_1 Y(s) S + C_0 \cdot Y(s) = X(s)$$

移项可得出它们的传递函数 $G(s)$:

$$(C_2 S^2 + C_1 S + C_0) Y(s) = X(s)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{C_2 S^2 + C_1 S + C_0} \quad \text{式中 } C_2, C_1, C_0 \text{ 均为常数}$$

用方块图表示为



由于微分方程经过拉普拉斯变换后转化成了代数方程, 因此也就用四则运算求解代数方程的工作取代了微分方程的求解

工作,从而使计算工作量大大减小了。这样一来,在系统动态特性的研究上,采用传递函数法明显优越于微分方程法,传递函数的概念也因此经典控制论中应用非常广泛。

由传递函数 $G(s)$ 的定义可知,它在输入量与输出量之间建立了联系,即

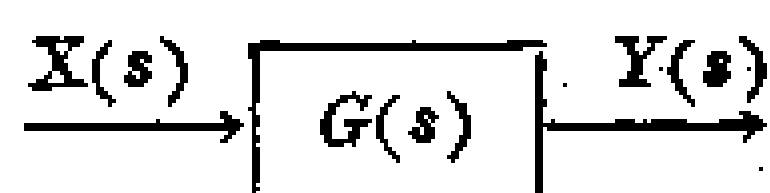
$$Y(s) = G(s) \cdot X(s)$$

若已知系统的输入量的拉氏变换 $X(s)$ 和传递函数 $G(s)$,那么就可由该式求得系统的输出量的拉氏变换 $Y(s)$,相应地也就求出了系统的输出量 $Y(t)$ 。由于传递函数描述的是系统本身的动态特性,是以系统参数来表示系统的输出量与输入量之间的关系,而不能表明系统的物理结构,所以许多物理性质不同的系统,只要其动态特性相似,就可以具有相同的传递函数。如图6.1所表示的两个系统,一个是机械系统,一个是电系统,它们的结构和物理性质完全不同,但因它们的动态特性相似,可用相同的传递函数来描述,所以人们说这两个系统在功能和行为上是相似的。只要给它们相同的输入 X ,它们就会有相同的输出 Y 。以这种功能和行为(输出)相似为基础,让它们中的一个作为模型,去模仿另一个(即原型)的功能与行为,这种方法就称为功能模拟方法。显然这种方法也可以说是以传递函数为依据的,上述两个系统,彼此之间能在功能和行为上进行模拟,原因也就在于它们具有相同的传递函数。

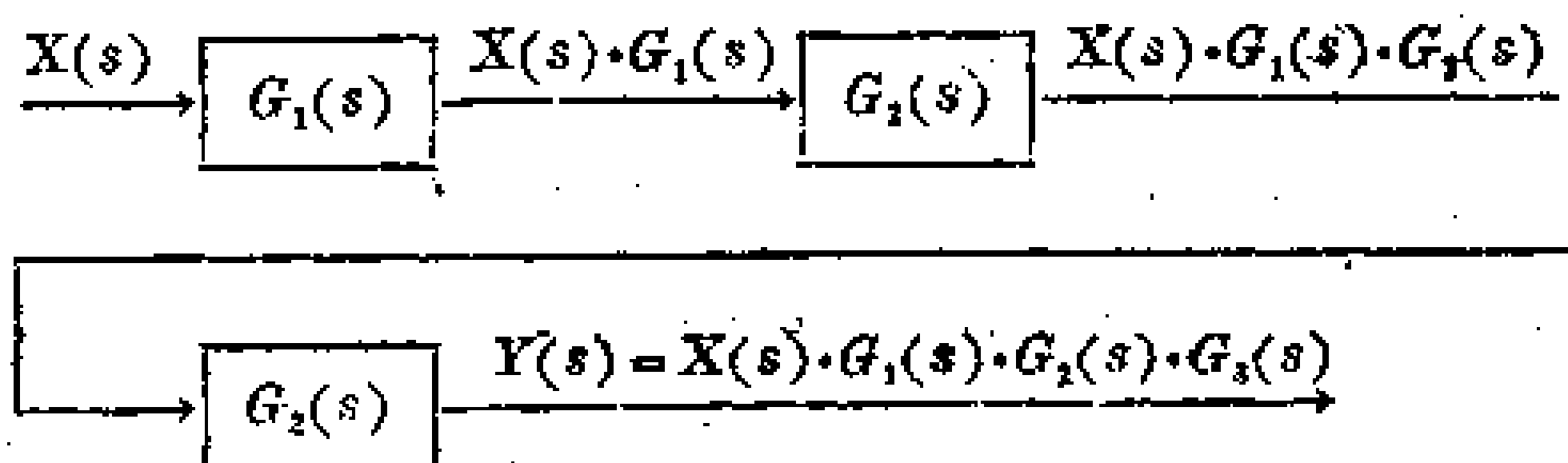
与功能模拟方法相关的另一个重要方法是黑箱方法。黑箱方法是在不打开黑箱的条件下,控制黑箱的输入变量,观察其相应的输出变量,从而研究和认识黑箱的输出和输入之间的关系,及其行为方式,进而推断黑箱的内部结构的一种科学方法。控

制论的这些研究控制系统的重要方法，不仅是控制论的重要内容，而且对其他科学（如人工智能，仿生学等）的发展也起着重要的作用，它们也是研究一些复杂系统的手段和方法。

传递函数的建立，并用来表示环节和系统的动态特性之后，这就给人们进一步研究控制系统的串联、并联、反馈等耦合关系带来了极大的方便。在经典控制论中，用传递函数来表示和在理论上研究控制系统，一般采用方块图。构成方块图的要素有信号线，分支点，偏差检测器（或称比较器、综合点），方块。信号线是带有箭头的直线，它表示信号传递的方向。分支点则是表示把一个信号分两路取出。偏差检测器的作用是将控制系统的输入信号与反馈信号进行比较，比较后所产生的输出信号等于输入信号与反馈信号的代数和。方块（或称方框）是用来表示接收信号，并把它变换成其他信号。方块中间写出环节或系统的传递函数。其图示为



方块与方块之间的有向联系，则表示了系统中各环节之间的耦合关系，即表示了它们之间的串联、并联和反馈等连接方式。如，串联连接方式就是指每一前置环节的输出量，只作用于后一个环节的输入端，并作为后一个环节的输入量，而最后一个环节的的输出量，则是整个串联环节的的输出量。其图示为



以传递函数为依据,可画出其等效方块图:

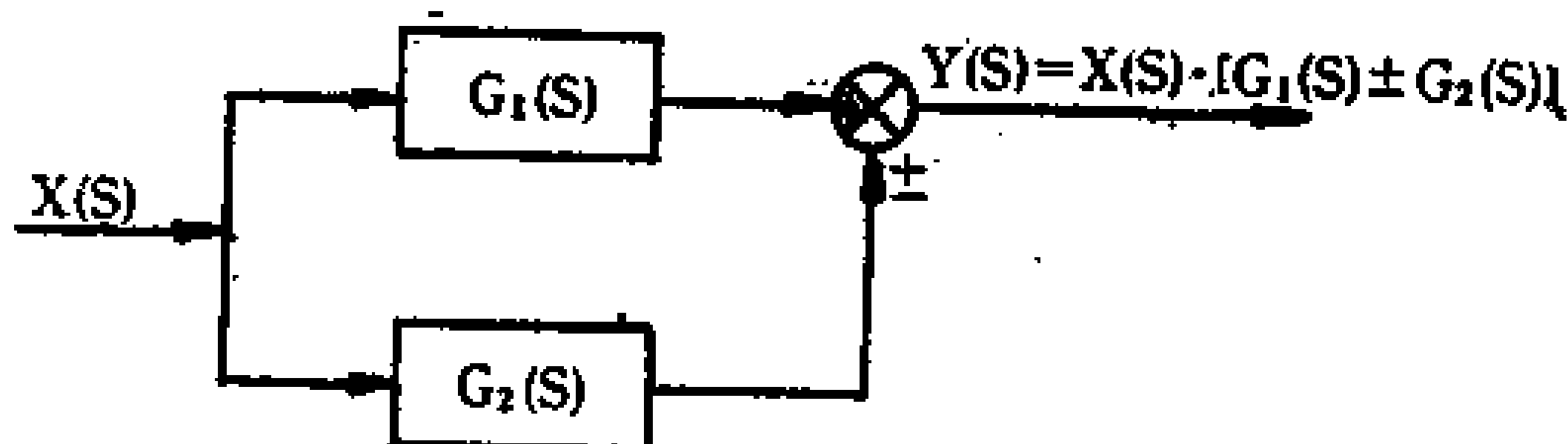


若有 n 个环节串联,各环节的传递函数分别为 $G_1(s), G_2(s), \dots, G_n(s)$,那么串联后的总传递函数为

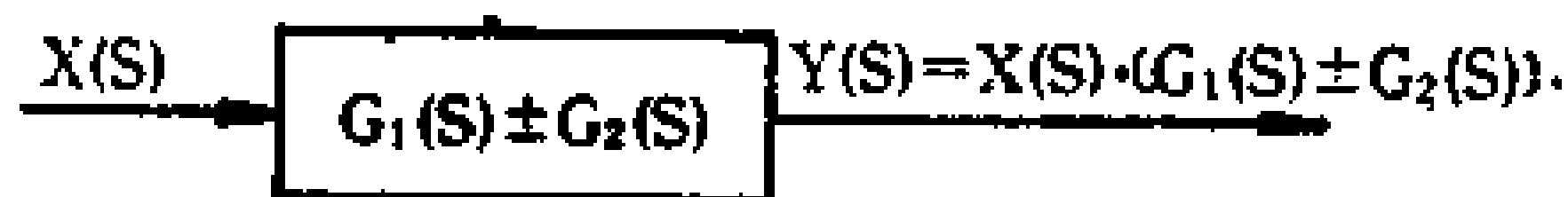
$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot \dots \cdot G_n(s) = \prod_{i=1}^n G_i(s)$$

该式表示,若干个环节串联,其总传递函数为各个环节传递函数之乘积。

再如:控制系统中各环节若以并联连接方式耦合。则并联连接方式是指每一个环节同时受到相同的输入信号的作用,其总输出等于各个环节输出的代数和。两个环节并联的图示为



以传递函数为依据,可画出其等效方块图



若一个控制系统有 n 个环节并联,总传递函数等于各个环节的传递函数之代数和。其表达式为

$$G(s) = G_1(s) + G_2(s) + \dots + G_n(s) = \sum_{i=1}^n G_i(s)$$

综上所述可以看到,一个复杂的控制系统,若由不同连接方式的多环节构成,在系统分析时,常常需要对系统的结构图作一

定的变换和简化。进行这种变换和简化就须以传递函数为依据。因此传递函数法的应用,对于简化复杂系统,便于对复杂系统进行系统分析,以及研究各种输入对系统性能的影响都有着重重要作用。

三、状态空间法

随着现代工业生产朝着大型化、连续化和自动化的方向迅速发展,工程系统由于复杂的任务和高精度要求,其现代趋向也朝着更加复杂的方向发展。而复杂系统可能是多输入多输出的,也可能是时变的(即描述系统的微分方程的系数不是常数,而是时间的函数)。对这类性能指标要求严格的复杂系统,经典控制理论就无能为力了。于是在1960年左右发展起来了一种新的理论和方法,即现代控制理论。

现代控制理论不同于经典控制理论,后者只能适用于线性定常、单输入-单输出的系统,而现代控制理论却可用于多输入-多输出的系统,系统本身可以是线性的或者非线性的,定常的或时变的。在该理论中,描述系统的基本方法是状态空间法,描述系统的数学模型是状态方程。

在控制系统中,状态随时间变化是有一定规律的,描述状态变量随时间变化规律的状态方程,它一般是写成一阶矩阵微分方程的形式。在现代控制理论中,为了充分描述系统的行为和性能,就需要状态方程(即输入对状态变量的作用关系式)和输出方程(或称为观测方程,即输出和状态变量的关系式)。对于一个 n 阶连续系统,我们可以用微分方程来表示,其表达式为

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + a_2 y^{(n-2)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = u \quad (6.1)$$

式中 $y^{(n)}$ 为输出变量 y 的 n 阶导数, $y^{(n-1)}$ 为 y 的 $n-1$ 阶导数, $y^{(n-2)}$ 为 y 的 $n-2$ 阶导数, $\dot{y}$ 为变量 y 的一阶导数, $a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n$ 为常系数, u 是系统的输入变量。

在上述微分方程描述的系统中, 若已知初始时变量 $y(0)$, 及其各阶导数 $\dot{y}(0), \ddot{y}(0), \dots, y^{(n-1)}(0), y^{(n)}(0)$, 已知 $t \geq 0$ 时的输入变量 $u(t)$, 就完全可以确定系统未来的行为。因此我们可以取 $y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$ 这 n 个变量作为一组状态变量。根据上述描述系统的微分方程(6.1)式, 就可求得该系统的状态空间表达式。首先设状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = y \\ x_2 = \dot{y} \\ x_3 = \ddot{y} \\ \vdots \\ x_n = y^{(n-1)} \end{cases}$$

从微分方程 6.1 式, 可求解出最高次导数项 $y^{(n)}$, 然后将所选定的状态变量代入系统的微分方程中去, 就可得到下列方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{y} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{y} = x_3 \\ \dot{x}_3 = \dddot{y} = x_4 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = y^{(n-1)} = x_n \\ \dot{x}_n = y^{(n)} = u - a_1 y^{(n-1)} - a_2 y^{(n-2)} - \dots - a_{n-1} \dot{y} - a_n y \\ \quad = u - a_1 x_n - a_2 x_{n-1} - \dots - a_{n-1} x_2 - a_n x_1 \end{cases}$$

或以矩阵形式表示

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u$$

这个方程式就是一阶矩阵微分方程, 称为系统的状态方程。

式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

输出方程(即观测方程)为

$$y = x_1$$

其矩阵形式是

$$\therefore \text{有 } y = [1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$$\therefore Y = CX$$

其中

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0]$$

由此可见,状态方程和微分方程均可用来描述一个系统,它们之间是相通的。已知描述系统的微分方程,根据上述步骤,就可将微分方程化为状态方程。

例:已知描述系统的微分方程为

$$\ddot{y} + 6\dot{y} + 11y = 6u$$

初始条件: $y(0) = y$, $\dot{y}(0) = 0$, $\ddot{y}(0) = 0$

式中 y 为系统的输出, u 为系统的输入。从已知微分方程,求系统的状态空间表达式。

设:选取的状态变量为

$$\begin{cases} x_1 = y \\ x_2 = \dot{y} \\ x_3 = \ddot{y} \end{cases}$$

初始条件: $x_1(0) = x_0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$

则有状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{y} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{y} = x_3 \\ \dot{x}_3 = \dddot{y} = 6u - 6\ddot{y} - 11\dot{y} - 6y \\ \quad = 6u - 6x_3 - 11x_2 - 6x_1 \end{cases}$$

将这三个一阶微分方程合并,可得出描述系统的矩阵方程,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & -6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \end{bmatrix} [u]$$

即

$$\dot{X} = AX + Bu$$

输出方程为

$$y = x_1 = (1 \ 0 \ 0) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$Y = CX$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -6 & -11 & -6 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \end{bmatrix}, \quad C = (1 \ 0 \ 0)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

由输出方程和状态方程,可绘出描述系统的状态变量图 6.2。因有

$$y = x_1$$

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad x_1(t) = \int_0^t x_2 dt + x_1(0)$$

$$\dot{x}_2 = x_2, \quad x_2(t) = \int_0^t x_2 dt + x_2(0)$$

$$\dot{x}_3 = 6u - 6x_3 - 11x_2 - 6x_1$$

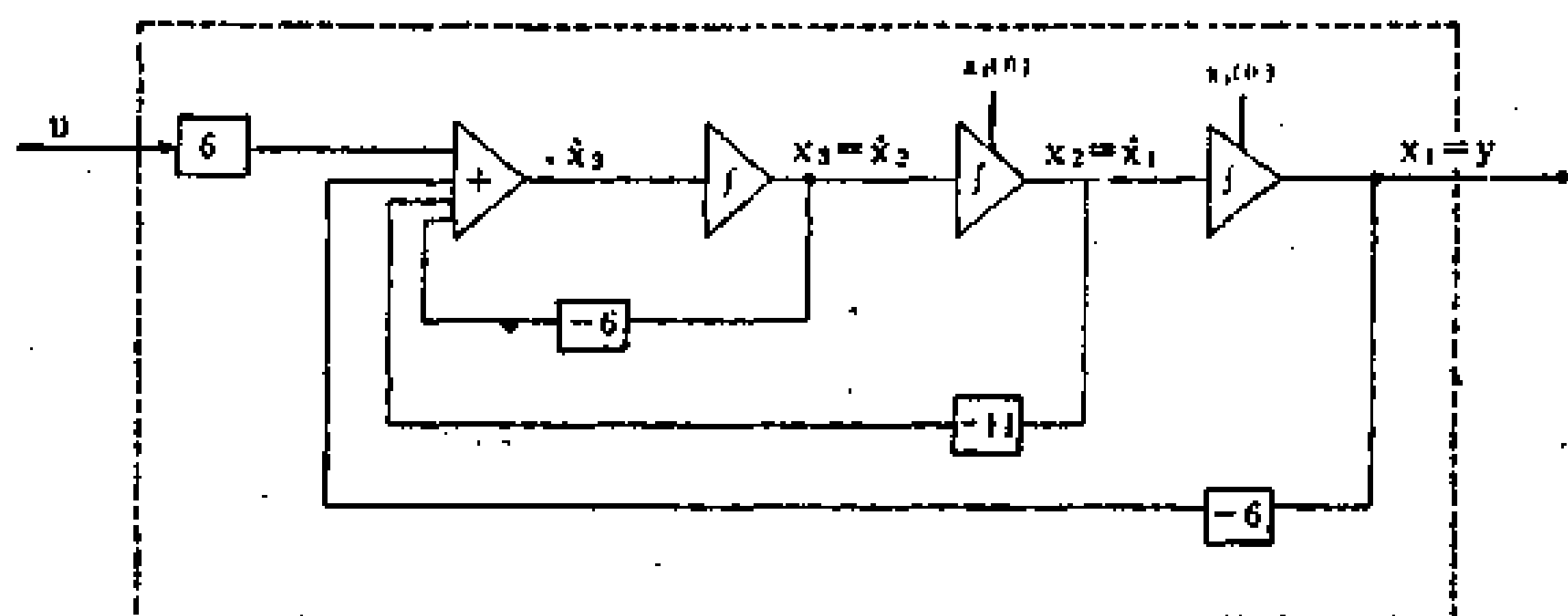


图 6.2 状态变量图

从这一状态变量图可以看到,通过方程 $y = x_1$, 反映了系统内部因素与外部输出量之间的关系。上图有加号的三角形为加法器,有积分符号的三角形为积分器。

由于现代控制理论是建立在状态概念的基础上,运用状态方程来描述系统,应用状态空间法来分析系统,所以它就克服了经典控制理论的局限性。它不仅适用于多输入-多输出系统、适用于非线性系统和时变系统,而且还为最佳控制问题的研究带来了方便。在经典控制论中,系统的设计和优化本质上是建立在试探法的基础上的,这与设计人员的经验有很大的关系,因而通常不太容易得到最佳控制系统。在现代控制理论中则不同,一方面它能使工程技术人员依据给定的性能指标设计出最佳控制系统,另一方面还可用更一般的输入代替特殊的输入函数来实现最佳控制系统的设计。

四、大系统的控制方式

随着科学技术的迅速发展和相互渗透，随着控制理论的应用范围愈来愈广，在其研究对象中出现了一些规模庞大、结构复杂、目标多样、功能综合、因素众多的大系统。研究各种大系统的控制和信息过程的共同规律的理论，就是大系统理论。大系统理论是控制论发展的一个崭新阶段，是本世纪七十年代才建立起来的理论。它是控制和信息科学、社会经济科学、生物生态科学等相互渗透的产儿。目前它虽处在初期发展阶段，理论还很不成熟，但已活跃在广泛的领域里，引起了大家的关注和重视。

大系统是大系统理论的研究对象，其控制方式大致可分为三类。一是集中控制。所谓集中控制方式就是由中央控制室对被控过程或对象进行集中检测和控制。所有信息都要集中到中央控制室来，作为决策和控制的基础，所有控制指令也都由中央控制室直接发出。象一些图书资料中心，就将资料集中在一台大型电子计算机中，各个终端都由中央控制室直接协调，好比城市里出租汽车站直接协调所属出租汽车一样。国外有一些国家就是利用电子计算机的储存装置，将所收录的国内外犯罪人物的一切资料，甚至包括声音、头发、使用物品等分析资料全部存入电脑，仿若犯罪人物百科全书，然后借助电子计算机来辨别案情。这种集中控制的好处是能够高度集中地进行协调控制，但要求计算机可靠性很高，否则一个环节出故障，就会使整个系统瘫痪。对于层次结构复杂的系统，象一个国家，如果经济管理完全采取集中决策，集中计划，产品集中分配，整个生产系统、分配系统等都采取由中央主管部门集中控制和协调，往往就会限得

过死,脱离实际,造成彼此脱节,贻误大局。特别是在现代化管理手段尚未具备的情况下,结构复杂的大系统过分集中控制的可靠性就更差,经济更不合算。

二是分散控制。因为集中控制有它的局限性,它需要集中全部信息,集中完成全部运算。也就是要求在单一地点发生,或是各子系统的信息能及时反馈给控制中心。但如果一些系统缺乏及时集中全部信息的条件,或缺乏及时集中计算的能力,则集中控制的前提就不能得到满足。而分散控制方式则是由若干分散的控制器来共同完成大系统的总任务,每个分散控制器只需获得大系统的部分信息,对系统的各个组成部分和过程进行局部控制。例如城市交通管理,就是由分散在各路口的交通岗来分别控制、指挥自己分管的街道路口的来往行人和车辆,从而实施交通系统的管理。这种分散控制在自然界和社会中都是屡见不鲜的。例如“百足之虫,死而不僵”中的百足,它是一种虫名,即马陆,长寸许,躯干二十节,切断后仍能蠕动。这是由于百足这类低等动物没有高等动物那种集中的神经系统,而是一种分散控制的神经系统,因而被切断部分对未被切到的部分的影响不象高等动物的那些明显。又如生态系统,山区农业生产系统,商业供销系统等,这类系统地理上的分离就是一突出特点。而在地域分散、随机变化多的情况下,要用一个控制中心或一台计算机设备担负各分散子系统和全过程的信息交换和控制协调常常是不可能的。一般说来,对于庞大分散的系统,是不适于采取完全集中控制的,有时那怕是采取完全分散控制,也能达到比完全集中控制更高的效率和可能性。分散控制的思路,实际是集中与分散相结合,反对一刀切,强调因地制宜以求总体上

的协调控制。但是分散控制存在的问题是由于各个子系统信息联系受到限制或彼此互不相干,必然使总体协调更为困难,甚至会出现彼此干扰情况,这都不利于系统整体的模型设计和实现整体决策的优化,这方面的理论尚有待进一步发展。

三是多级递阶控制。多级递阶控制是一种既能兼顾集中控制方式和分散控制方式的优点,又能克服两者的缺点的新型控制方式。多级递阶控制系统可以是两级的,必要时也可以是三级、四级、甚至更多级的控制系统。在多级递阶控制系统中,第一级是直接作用于被控对象或过程的局部控制器,它们所进行的是“下级的”、第一线的“基层”决策,完成的是相应的局部控制任务。第二级是对第一级各控制器进行协调工作的“协调器”,它进行“上一级”的决策,完成较大范围的决策与控制。第三、第四等各级控制器也完成类似的任务。不过控制范围及集中控制的程度都比第二级要更大一些。最上一级控制器则是完成大系统全局的控制总任务。但是在二级递阶控制系统中,第二级控制器的任务有所不同,它既对第一级控制器进行协调,进行“上一级”的决策,同时又完成大系统全局控制任务。

由此可见,多级递阶控制是集中控制和分散控制相结合的产物。它集中了两者的优点,使系统具有可靠性高,其控制设备便于维修和更新等特点,降低了设备的费用,简化了系统的分析与设计;而且由于有协调控制环节,因此它的协调的有效性比靠互相通讯来协调的分散控制要高得多。

在这里值得注意的是,多级递阶控制既是社会经济大系统,也是生物大系统常见的控制方式。它在工程和非工程的大系统中已被普遍采用。这正好说明,各类大系统都具有类似的结构

与控制决不是什么偶然巧合的现象，而是各种大系统在客观上存在着共同的运动规律，所以它应该受到高度重视和深入研究。目前，大系统理论的基本内容，也多是基于对共同运动规律的研究，是在对大系统的控制过程和控制方式的分析研究的基础上建立和发展起来的。

综合上面所述的控制理论发展的各个阶段的基本思想和基本特点看，它们都涉及到控制、信息、调节等重要概念，这些概念都是控制理论的基本概念，对它们的深入研究，会影响人们对控制理论的基本思想的理解和把握。所以下面我们将对这些概念作进一步的分析和比较。

第二节 控制与调节

一、控制及其基本特征

控制是控制论中的重要概念之一，在控制论诞生之前，控制被理解为人类的一种活动，仅限于说明人们有目的地作用于某一对象或过程，使其按预期的方向变化这样一种人类的活动。它是从人们所主宰的一些极不相同的活动中，如从马车的驾驶，船舶的操纵以及国家的管理等方面，认识到它们某些共同的特征，而逐渐形成的概念。控制论的产生则大大地拓宽了这一概念的外延，使它能广泛地应用于人类社会系统、工程技术系统，以及生物系统之中。因为人们已经充分认识到，在这些极不相同的系统中，都普遍存在着本质上相同的控制过程。正因为如此，所以从最一般的意义上说，控制是在获取、加工和使用信息的基础

上，控制主体使被控客体进行合乎目的的动作。其基本特征可以从这样三个方面来理解。

1. 控制是控制部分(即控制主体)对被控客体的作用。

当我们一涉及到控制，就必须有实施控制的部分和被控制的对象，前者对后者的支配作用就是控制。包含有施控部分与被控对象的全部系统，称为控制系统。在这里，施控部分可以是人，也可以是自动控制系统中，具有控制功能的机械等。被控对象可以是一种器械，也可以是一个生产系统或过程等。控制部分对被控客体的支配作用则表现为：使被控对象进行合乎目的的变化，并进入所需要的状态，也就是使被控对象表现出一种对运动的选择性。

2. 控制具有明确的目的性。

控制论是一个与目的性直接相关的概念。对某一系统进行控制，就是为了保证该系统在变化着的外部条件下能实现某种既定目标，即使系统表现出某种有目的的行为。控制的这种目的在行为特征中表现为两个方面：一方面是，当系统已处于所需要的状态时，就力图保持系统原有状态的稳定；另一方面是，当系统不是处于所需要的状态时，则引导系统由现有状态稳定地变到一种预期的状态。在这里控制就是将被控客体引入符合这一目的状态的过程。若被控客体面临众多可能状态时，控制作用就是使客体按要求选取特定的某一状态或某一状态系列，而这一特定状态或状态系列与系统的目的存在着某种对应关系。因此控制并不是将系统引入任何状态，而是引入目的所要求的状态。可见，没有目的性就谈不上控制，目的性正是控制的一个实质性标志。

8. 控制是获取、加工和使用信息的过程。

为了使系统表现出目的性,就需要获取并使用信息,以这种信息为基础而选出的加于对象上的作用,就叫做控制。信息在控制过程中的作用表现在两个方面:一方面,是要根据各种有关信息才能编制出为使系统与外界环境保持平衡状态的各种指令;另一方面,系统在运行中会碰到干扰,从而使系统偏离控制目的所要求的状态,这时需要掌握干扰信息或系统状态信息,将它们转换成抵消或纠正偏差的控制指令,以保证系统目的的实现。在这里,控制实际上就是信息的获取、加工、传输和使用的过程,它将所获得的信息按控制的目的进行变换(加工),再作用于(即传输给)被控对象,实现控制的目的。所以控制也就具有了两个方面的内容,即确定系统状态变化的轨道(确定目标和实现目标的途径);用调节的办法使系统的运动保持在这一轨道上。控制子系统也因此分为两个部分,即决策单元和调节单元。

由此可见,现在在控制理论中,控制不再是简单地盲目追求目标值,它已发展成为适当地选择目标值本身。而且为了实现控制,就需要调节。

二、调节、偏差调节与补偿调节

调节就是使系统的特征保持一定的过程。这一概念在自动调节原理中,被定义为“保持被调量在其给定值附近的动作就叫调节”。被调量即是输出量或称观测量,给定值即是输入量或称为目标值。调节本质上就是使系统的特征保持一定的过程,是把系统状态引入并保持在一定轨道上的过程。从前面所讲的控制具有两方面基本内容,即确定系统状态的轨道,和使系统保持

在这个轨道上来看,调节只是控制的一部分内容,是控制过程中的一个重要环节。如在管理中,使企业系统的状态保持在计划轨道上的活动,确切地说,这是管理的调节职能。而管理工作应该包括确定目标及编制计划,以及使生产经营活动保持在计划要求的轨道上这样两个方面的基本任务。所以从本质上来考察管理,并将它与控制进行比较,就不难发现,管理就是控制,管理与控制具有相同的基本特征,管理的整个过程就是管理系统的控制过程,这两个概念没有根本区别。

调节一般可采取两种方式,一是依靠系统的实际输出值 Y 与目标值 X 之间的偏差进行调节,这称为反馈调节(如图 6.3 所示)。当偏差值为目标值与反馈值 X_b 之差时,就称为负反馈调节;当偏差值为目标值与反馈值之和时,则称为正反馈调节。另一种是预测干扰,用补偿的方式进行调节,称为补偿调节。这种方法实际上是提前预测干扰并作出对策,它一旦行动起来,就无需回顾控制的结果。在这种控制系统中,由于没有反馈,所以有必要周密地计算和安排它的动作程序。补偿调节要求直接接收外界干扰的信息,同时还要具备干扰对系统产生影响的知识。由于背景的随机性,要预测所有干扰发生的具体时间、强度等有一定的困难,因此在控制论中就特别强调反馈调节的方法论意义。

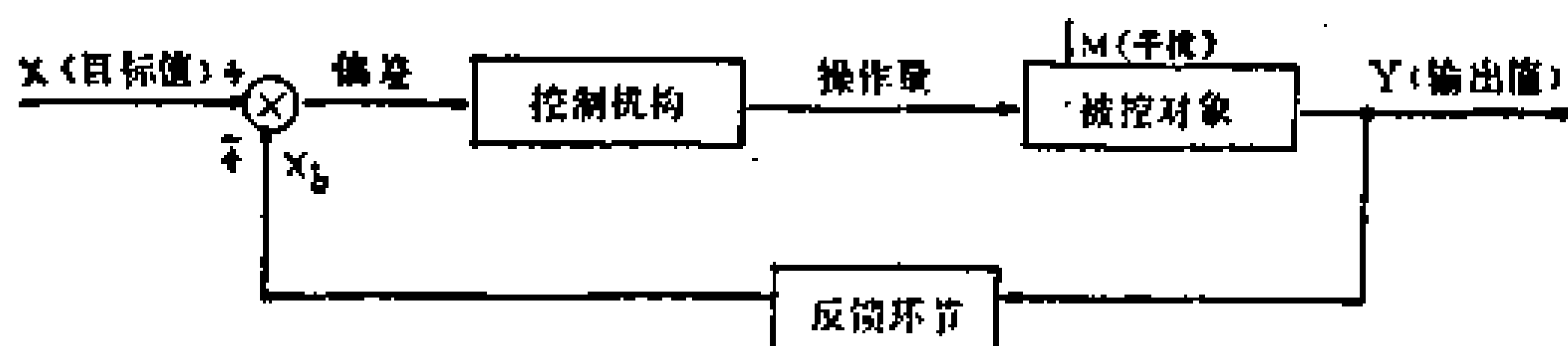


图 6.3 反馈调节

在经典控制论中,主要研究的是单一回路的反馈调节系统,按照线性控制系统那样,它仅仅把目标值与被控量的偏差当作基本量。利用这种偏差值进行调节的,为偏差调节或有差调节。而偏差调节原则正是自动调节系统的设计和建立的基本原则。

综上所述,调节是控制内容的一部分,是控制过程中的一个环节,而反馈调节还只是调节中的一种方式。因此将反馈调节的概念与控制概念完全等同起来,甚至用前者取代后者都是不恰当的。

三、控制方式

在控制系统中,实现控制的目的可以采用不同的控制方式,一般可分为如下几种:

开环控制。所谓开环控制方式就是系统的输出量对系统的控制作用不产生影响的一种控制方式。具有这种控制方式的系统称为开环控制系统。开环控制方式是通过控制初始条件,使事物向要求的状态转移,并设法排除干扰,使系统不受干扰的影响,能准确无误地转移到目标状态,因此人们又将这种控制方法称为排除干扰的方法。由于干扰无法对系统发生作用,一般只要控制初始条件,也就能保证系统按目标要求运行。如一些城市中,十字交叉路口的交通指挥系统等,就属这类控制方式。开环控制方式具有控制过程简单,稳定性好等优点。在对象过程简单,外界影响较小的情况下,它能很好地实现控制的目的,但它不是到处可行的方法。

前馈控制。它是一种带补偿的控制方式。在本质上可以说它也是一种开环控制,不过它不是消极防御干扰的影响,而是不

断地直接接受干扰信息,根据干扰对被控对象可能产生的影响,产生一补偿信号,用以抵消干扰的作用,使系统输出不会因干扰的存在而发生变化。如图 6.4 所示控制器直接获取干扰(M)信息,经过控制器产生一控制作用 u ,它输入给被控对象以补偿干扰 M 对输出量 Y 的作用。只要使控制作用所引起的偏差 $\Delta Y(u)$ 与干扰引起的偏差 $\Delta Y(M)$ 之和等于零,即 $\Delta Y(u) = -\Delta Y(M)$,那么前者就完全能抵消后者,从而保证了输出稳定在要求的状态上,或者按要求的状态序列变化。

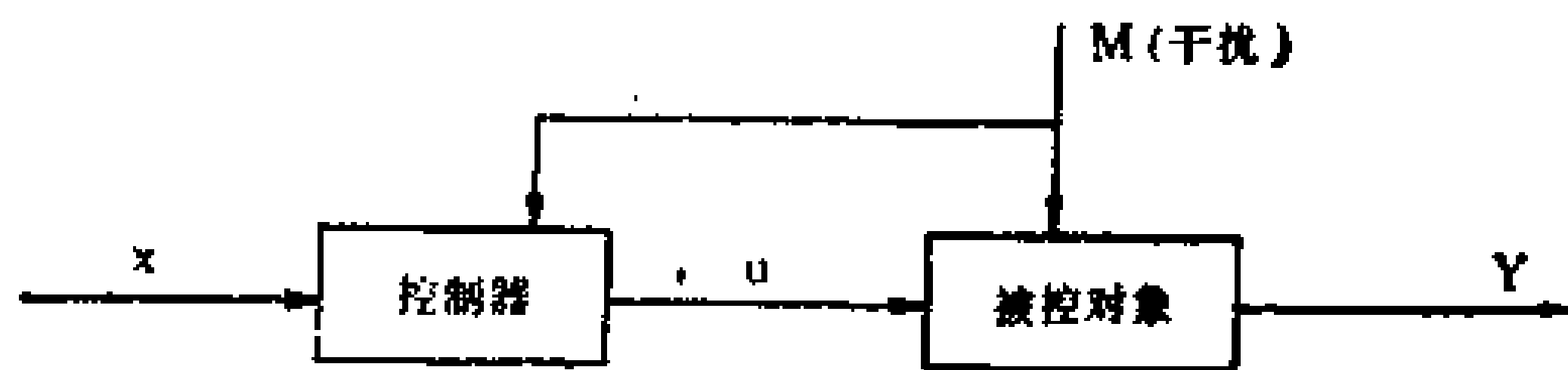


图 6.4 带补偿的控制系统

这种控制方式是以要求能测得干扰信息,以及具备有关方面知识(如干扰对系统产生什么样的影响和影响方式等方面知识)为前提的。在这类控制系统中,也要有预测、决策环节,并注意预测与决策方法的运用。这样才能估计出可能产生的问题,采取防预措施,以防患于未然。但是,有些随机因素难以预测,因此采用带补偿的控制方式会遇到一定的困难,会受着某些条件的限制。在条件不允许的情况下,人们就很难采用前馈控制,而更多地采用闭环控制方法。

闭环控制。这就是系统的输出量对系统的控制作用能产生直接影响的一种控制方式。具体讲,就是因干扰的影响,会使系统的输出量相对于目标的要求而言,产生了偏差。根据这一偏

差，产生一个控制信号，以纠正因干扰所引起的误差，抵消扰动的作用。由此我们可以看到，控制作用 u 是由实际的输出状态来确定的。如图 6.5 所示，当输出变量 Y 偏离目标时，控制器就能根据这种偏差，产生一种抵消该偏差的控制作用，以保证输出能满足目标的要求。这种控制方式实质上是以反馈调节为基础的。由于控制作用中使用了输出信息，使控制部分与被控部分构成一闭环回路，所以这种控制方式就称为闭环控制或反馈控制。如蒸汽机中的调速器(图 6.6)，就是一个反馈控制系统。送入发动机(即蒸汽机)的蒸汽量的多少取决于它的负载的大小。如果负载增加，蒸汽机转速就会下降，送汽太少，就会停止转动，要保持恒速就需增加进汽量，送汽太多，则引擎飞转，甚至可能发生事故。因此，将图中这种设备放到进汽管道中，就可用来监视送入发动机的汽流量。这个调速器在蒸汽流冲击下旋转起来，使两个重锤 W 扬起，从而将盘子升起，这个动作反馈回去，通过阀门杆传到阀门。当重锤升起时，阀门关闭，当转速变慢，重锤下落时，阀门打开，使送汽量增加。这样，调速器就可以自动地防止任何偏离预定速度的偏差，或者消除偏离预定位置的误差。

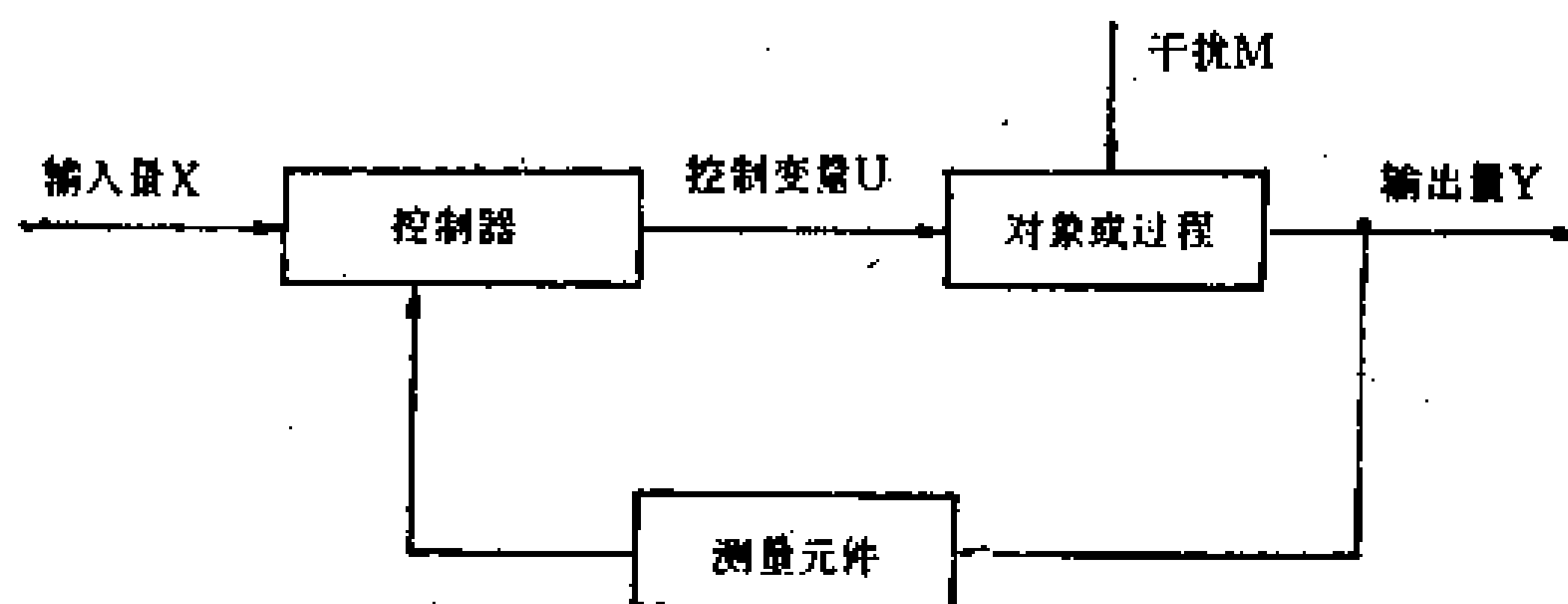


图 6.5 闭环控制系统

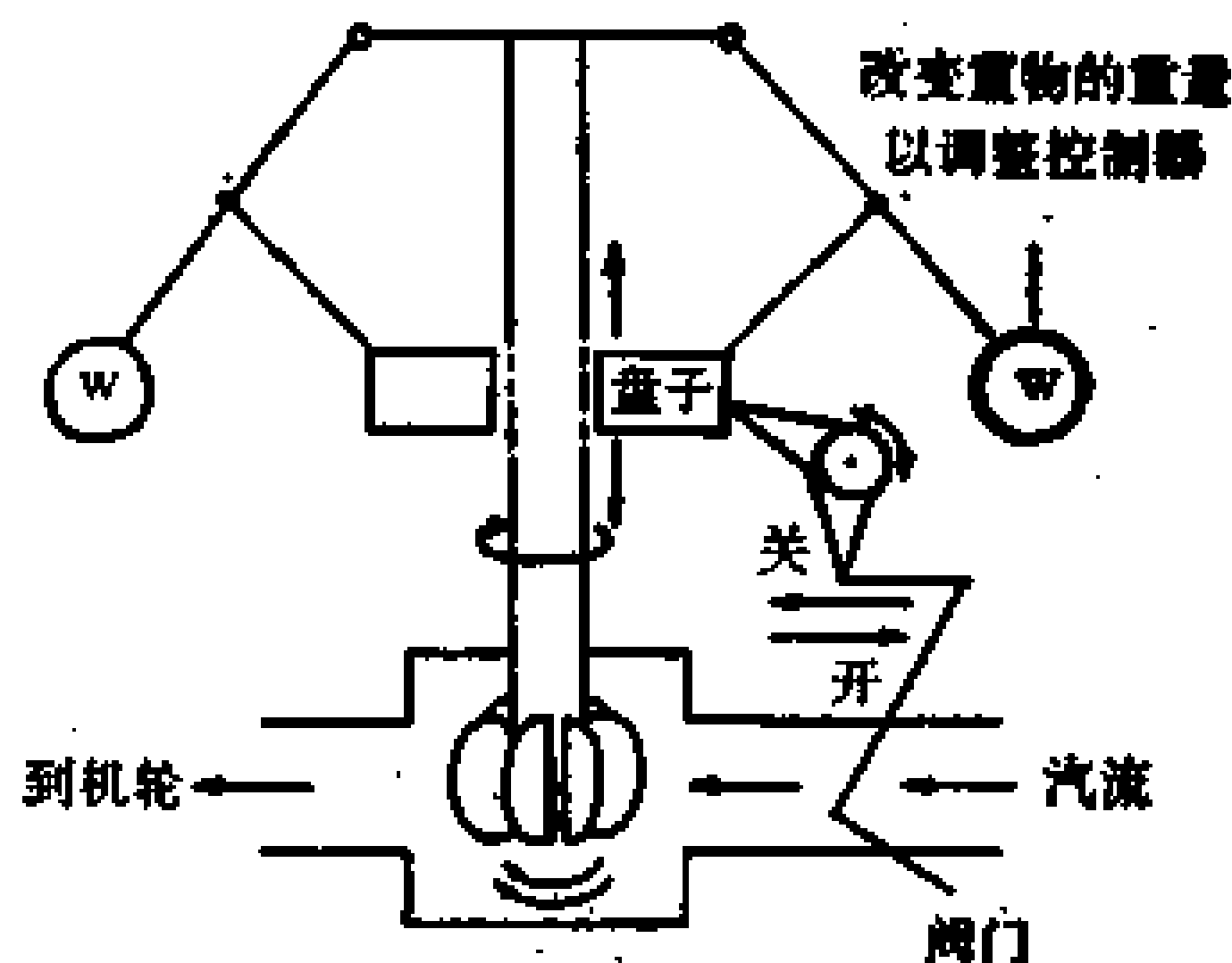


图 6.6 瓦特的调速器

工程师则可通过改变重物 W 的重量,来调整调速器。

这种闭环控制方式要求反馈速度充分快,否则将产生较大的时滞,影响控制质量,乃至产生震荡。

与反馈调节相对应,闭环控制方式也有两种形式,即正反馈控制与负反馈控制。在闭环控制系统中,负反馈就是反馈倾向于反抗系统正在进行的动作,这是稳定动态系统的重要手段。在技术系统、生物系统和社会系统中,都存在着这样一类现象,即在某些系统中,要求保持某种相对的平衡,保持相对的稳定状态,否则系统就可能因此而解体。如有些仪器、设备需要在恒温下才能正常地工作。蒸汽机的速度不能太快,否则会出危险。人的血压、体温等也要求保持正常(即相对稳定状态),否则就说明体内某个部分发生了故障。但是,实际上这些系统总是受着输入和内外干扰的影响,会产生某种不稳定现象,使系统的行为(即输出)偏离了目标。这就是在系统的稳定性要求与系统实际状态之间出现了矛盾,为了解决这一矛盾,就通过系统中的反馈装置,测出被控对象的输出量,估算出其运行状态的性能指

标,进行放大、变换,产生相应的反馈信号,送到控制器。控制器将所接受的外界输入信号及由反馈装置传来的反馈信号进行比较、分析、判断、处理,向执行机构发出适当的控制信号或指令。执行机构接受并执行这种来自控制器的控制指令,进行功率放大或能量转换,从而产生相应的控制作用,施加到控制对象上。如果输入大于输出,控制作用是使控制对象的输出增大,以达到目标值。相反,如果输入小于输出,控制作用是使控制对象的输出减小,以达到目标值。总之,控制作用的结果,是使控制对象的输出朝着减小目标差的方向改变。这就是通过负反馈调节来实现控制的方法。相反,控制作用的结果,是使控制对象的输出朝着增大目标差的方向改变,即如果原来输出大于输入,控制作用是使控制对象的输出更加增大,朝着增大的方向更加偏离目标(正向偏离)。若原来输出小于输入,控制作用是使控制对象的输出朝着更加减小的方向偏离目标(负向偏离)。这在控制论中就是通过正反馈调节来实现控制的方法,所以正反馈就是反馈倾向于加强系统正在进行的动作。

这两种方法在控制系统中各自具有独特的作用。如果对那些要求保持稳定的技术系统或生物系统,就常常要采用负反馈控制方法,力图实现系统对稳定性的追求。象企业管理中,注重成果的工作方式,本质上就是负反馈控制方法在管理中的具体应用。上级主管部门对下属是根据工作成果进行考核,它注重的是工作成果而不是工作方式,因为再好的工作程序也要通过成果(输出)反映出来。这就克服了以往那种企图通过严密的工作程序使工作规范化,以减少失误的方法所带来的某些不切实际的东西。因为影响企业的产品质量和销路的因素很多,存

在着大量难以预测的随机因素的干扰,妨碍了企业目标的实现,这种情况显然不适于用开环控制方式进行管理,也就是不能采用那种忽略环境变化对企业系统的影响,过份强调硬性计划和规章制度的作用,使下属人员工作规范化、程序化,把工作重点放在制订程序、规划及监督下属人员的工作方式上的管理方式。而须采用负反馈控制方式来管理,也就是采用成果工作方式进行管理。当然,在管理中也要克服单打一的倾向,因为管理系统中有某些子系统,也可能适于用开环控制方式进行管理,所以在管理工作中应根据实际需要确定控制方式。

在一些技术系统和社会系统中,常常需要采用正反馈控制方法。如电路中的信号放大系统,以及在社会经济系统中,为了扩大再生产,都需要恰当地采用正反馈方法。因为正反馈必然导致效应器不稳定,如果不断增加输入时,必然引起输出的连续增加,直至达到所需要的状态为止。一旦超过所需要的状态,就要采用负反馈来进行调节和控制了。当然在资本主义社会中,正反馈作用可使产品数量盲目增长,发展速度不加控制,最后必然导致生产与市场之间的矛盾(即供、求矛盾)加剧,为此就可能爆发经济危机。这种危机就会充当有力的负反馈调节器,来抑制无边无际地盲目扩大再生产的趋势。虽然有了这种负反馈控制,但因资本主义社会存在着生产社会化和生产资料私人占有这一固有矛盾,所以在那里,“危机”这个调节器不是控制论意义上的完善的调节器,因为它留下了干扰的重要痕迹。社会主义社会就应避免危机发生,在社会经济系统中,要自觉地运用闭环控制方法,有计划地来调整不断变化着的比例关系,以保证生产与市场的相对平衡。

现代, 由于通讯、预测和决策技术的日益发展和完善化, 使人们愈来愈重视带补偿的控制方式在管理中的应用, 也就是采用注重决策的管理方式来进行管理。因为这种管理方法特别注意信息的收集和决策的科学性, 它把人们的注意力引向对未来的关注, 其工作重点是在事先的预测上, 在干扰作用于系统之前, 根据预测采取相应的措施, 力图抵消干扰的作用。通过补偿的办法, 使企业的活动被控制在目标要求的轨道上, 所以许多现代化的大型企业, 特别重视这种控制方式在企业管理中的应用, 它们用于收集事先信息作出预测的费用, 要占整个管理费用的很大一部分。我国的一些大、中型企业, 也开始重视和使用这种管理方式, 它们已经认识到这种管理方法是实现最优化管理的一种有效方法。

第三节 系统的自适应控制

一、自适应控制系统的基本概念

大多数控制系统的动态特性, 由于种种原因的影响而不恒定。如系统中元件随着使用时间的增加而老化, 参数和环境的变化等。虽然, 在我们前面所讲的反馈控制系统中, 系统的前向通道环节参数或特性的一些不太大的变化, 对系统动态特性的影响可以被减弱, 这是因为有反馈调节的作用。但是, 当系统参数和特性随着环境条件和运行时间大幅度改变, 以及系统输入(包括扰动)的性质也发生变化时, 只有采用自适应控制, 使系统具有一定的适应能力, 才能满足要求。否则根本谈不上有最优

控制，严重时控制系统甚至无法正常工作。

“适应”是生物的一个基本特征，因为生物总是企图在变化着的环境条件下维持生理的平衡。自适应系统的一种设计思想，就是参照人和动物的适应能力来建立一种能同样行动的技术系统。所以艾什比在他的自适应定义里，认为自适应系统的稳定性要求表现为：如果一种行为方式能把它的本质变量保持在生理学限度内，则这种行为方式就是自适应的。

由此可见，假如一个技术系统，被设计成如同生物对环境的适应那样，对于不可预测的参数、特性和条件的变化，系统均能“适应”，改变自己的控制，具有满意的性能，那么它就是自适应控制系统了。所以人们将自适应控制系统定义为：它能连续自动地测量对象的动态特性（如传递函数），把它们与希望的动态特性进行比较，并利用差值以改变系统的可调参数（通常是控制器的特性）或产生一个控制信号，从而保证不论环境如何变化，性能都是最佳的。换句话说，这样的系统可以连续地按照给定的性能指标测量自身的参数，因而不论环境如何变化都保证最佳性能。根据这一定义，一个自适应的控制系统必须能自动测量系统的输出或被控过程的特性；或者辨识系统，并在此基础上，按预先规定的最优条件或特性，改变系统的可调参数（通常是控制器的参数）或系统的控制信号，从而保证系统在环境条件变化下有满意的性能。因此我们可用一方框图来表示一个典型的自适应控制系统。图 6.7 中，用性能指标计算机测量系统的输出，辨识系统的动态特性；然后将所测得的实际情况与希望的特性（或最优值）进行比较；根据比较结果，在自适应机构或计算机中决定究竟怎样改变控制器的可调参数、结构，以保证系统最

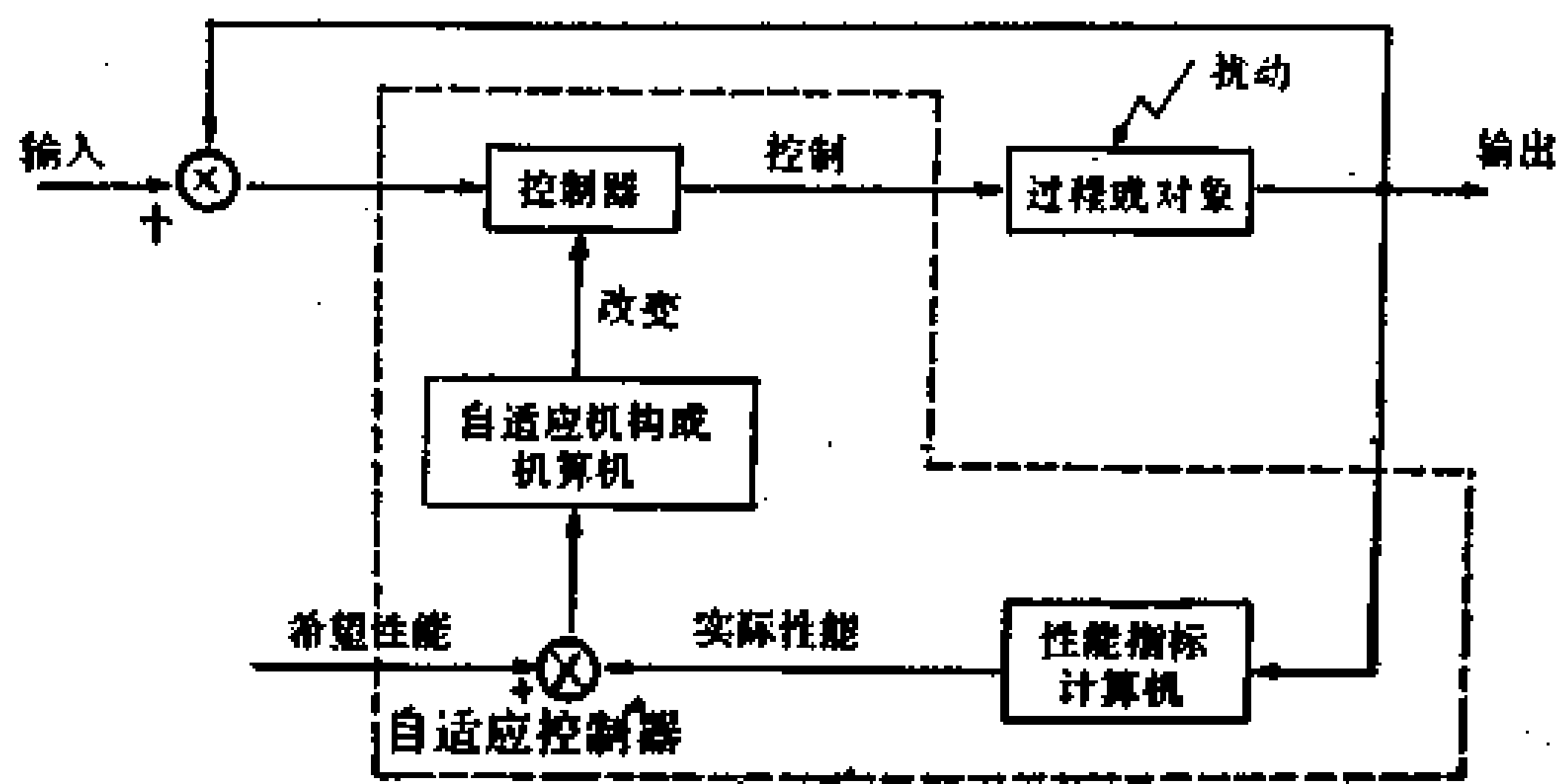


图 6.7 典型自适应控制系统方框图

优性能；并从改变了可调参数的控制器中输出控制信号，从而保证过程或对象得到合适的控制。

可见，在这里自适应控制系统完成了三个动作：辨识或测量、决策和改变。这三个动作在方框图中是由虚线内的部分或环节来完成的，这部分即为自适应控制器。在这里需要指出的是，虽然具体系统可以不同，但自适应控制器的职能是相同的。并且在自适应控制系统中，必须连续地或者是频繁地每隔一段时间都要进行辨识对象的动态特性或测量系统的输出。在这一过程中，可以利用正常工作数据，也可利用外加一微小的不致过分影响正常工作的测试信号，但不允许直接采用大扰动或者使对象脱离正常工作状态。辨识过程应该比对象参数的变化要快得多，否则得到的信息是过时的，是毫无用处的。对于有些系统不要求清楚地辨识，只要测量出性能指标值就可决定控制器应如何改变，因此测量出了性能指标就算完成了辨识。至于有些对象的辨识很困难，则必须直接测量性能指标，这时自适应控制

器就以它为基础进行动作。

性能指标。在自适应控制系统中，有一个按预先规定的最优条件或希望特性，它就是衡量系统的质量的最好标准，这一性能标准被定义为性能指标。一般最佳目标采用其极大值或极小值，如对某一企业而言，就是采用利润最大或者成本最小为其性能指标。显然，对于不同的系统性能指标是不一样的。其中所说的希望特性，可以是所选用的某个标准模型的输出。

性能指标一般应满足以下几个基本要求：1.容易测量。它应该在系统正常运行时容易测得，而且外加测试信号（或扰动量）要小；2.有良好的选择性。应该有明显的最优值，而不是局部最优。选择性越好，最优参数越容易确定；3.物理上能实现。根据性能指标的最优值导出的条件，在物理上（或技术上）是能够实现的。但是，在实际上所采用的性能指标常常不完全能满足这些要求，因此正确选择自适应控制系统中的性能指标是一件困难的事情。由于自适应控制系统的性能指标，规定了系统的最佳性能，这就意味着性能指标基本上给出了系统性能的上限，所以选择一个合适的性能指标又是一件十分重要的事情。

前面已经谈到自适应控制系统必须通过自适应控制器去完成辨识、决策和改变三个动作，下面我们分别说明控制器的这三方面职能。

对象动态的辨识。对象的动态特性必须连续地或频繁地进行测量与识别。这必须在不影响系统正常工作的条件下完成。识别系统特性的工作，必须是先测试然后再分析结果。也就是说，对于一个控制系统，需要先加一个控制信号到对象上，而后再测得并分析系统的输出（响应）。上述辨识可以利用对象的正

常工作数据或利用一微小的不致过分影响正常工作的测试信号来进行,这种测试信号可以是微小振幅的正弦信号或随机信号,但不可直接加上阶跃的或脉冲的输入信号。显然正常输入作为测试信号最为理想,但是,要利用正常输入来进行识别,就需要它有足够的信号特性(如频率、振幅等)才可能。

决策。这里是指在识别出对象特性和计算出性能指标的基础上进行的决策。即将识别出来的对象特性与最佳特性(或最佳性能)进行比较,然后确定究竟应怎样改变控制器的可调参数(控制器的特性),以使系统保持最佳性能。

改变。改变是指按照识别与决策来改变控制信号。这个控制信号,即是对对象的输入信号,可以用两种方式来改变。第一种方法是调节和改变控制器参数;第二种方法是以对象的传递函数、性能指标及所希望的瞬态响应为基础,综合出最佳控制信号,即控制信号综合。这两种方法在概念上是等效的。只是在那些可靠性要求十分高的地方,采用参数改变法比信号综合法要好。但是,对于元件的改进,特别是对复杂电子设备的改进,可能用信号综合法更好。所以在自适应控制系统中,采用什么方法来改变控制变量为好,就需要对具体问题作具体分析。

二、自适应控制系统的类型

自适应控制系统的类型有很多种,这里只介绍几种类型。

1. 高增益系统。

所谓增益就是指输出与输入之比。高增益系统如图 6.8 示,在该系统中,反馈回路的增益一直保持在稳定性允许的最大值上,从而在对象参数变化的情况下,使闭环系统的输出、输入的

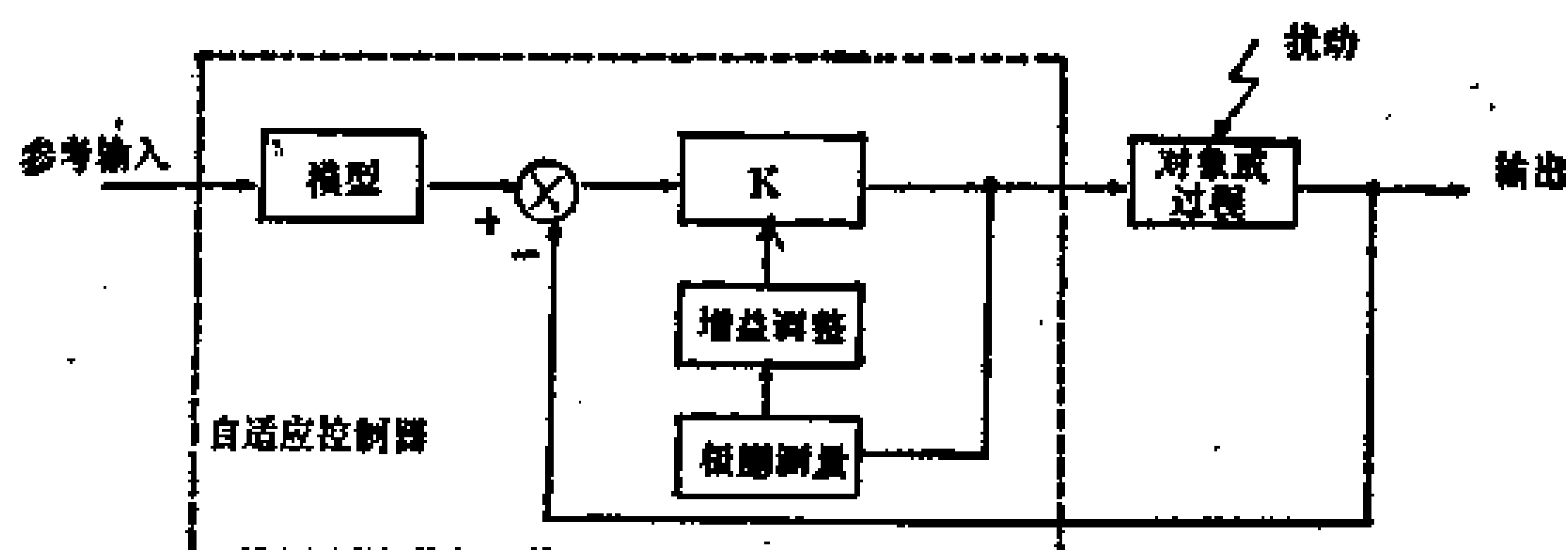


图 6.8 高增益系统

比始终接近于 1，系统的响应(输出)接近模型给定的响应。闭环系统的稳定性，由局部回路保证，它使参数 K 值调整到接近稳定临界值。这种系统会有小的振荡，但在有些场合应用是允许的。

2. 模型参考系统。如图 6.9 所示：

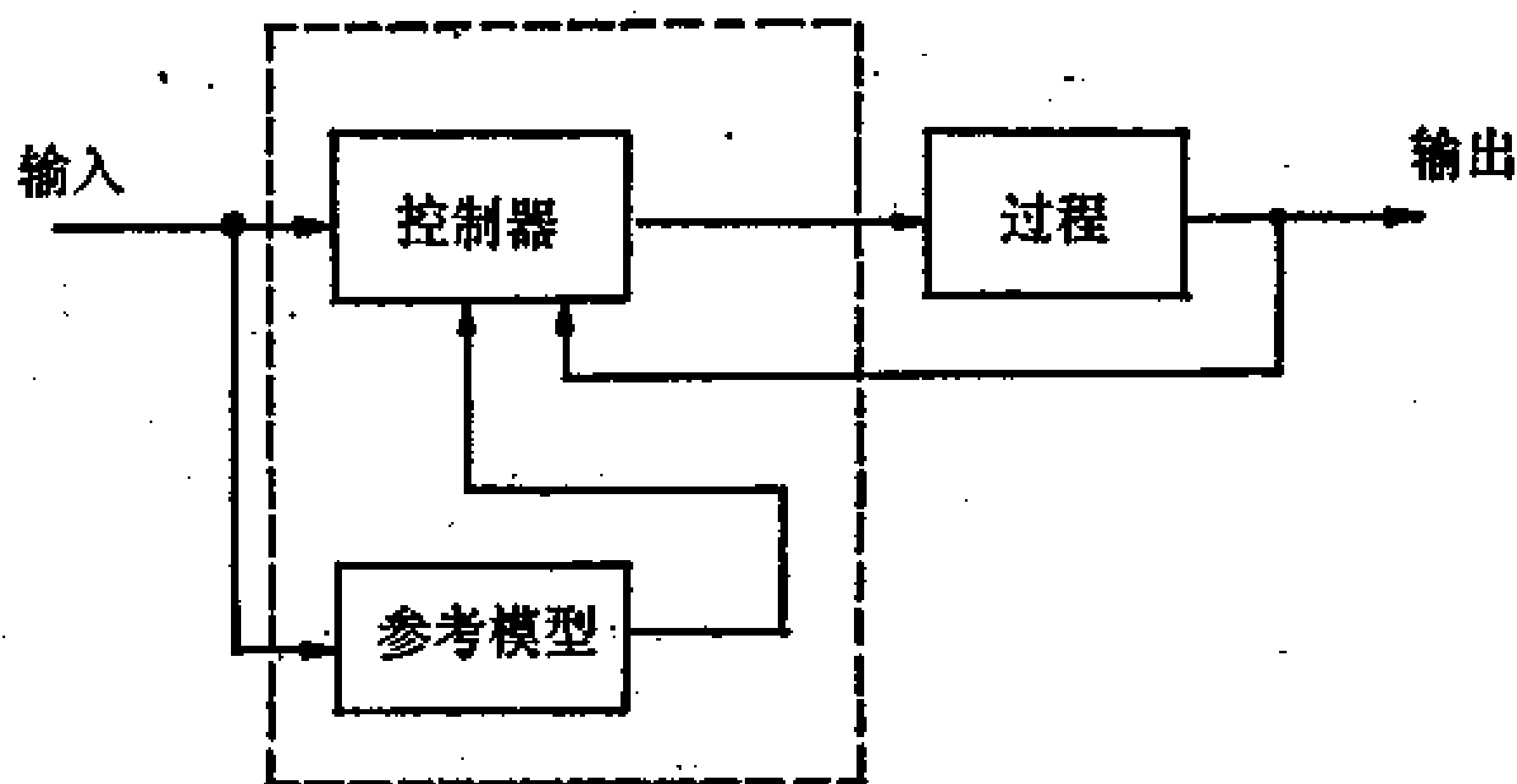


图 6.9 模型参考自适应系统

这里是利用参考模型，让一个给定输入产生希望的输出。系统由输入引起的实际输出和参考模型所产生的希望的输出在控制器内进行比较，其差值由控制器按预定的策略加工，给出改变信号，改变控制器的参数或结构，使其输给过程的控制信号，能

保证过程获得最优控制，使系统输出具有参考模型所希望的性能。

参考模型并不一定是实际的物理模型，它可以是数学模型，由计算机模拟产生。模型参考自适应系统的形式还有多种，这里不一一介绍。

3. 输入自适应系统。如图 6.10 所示

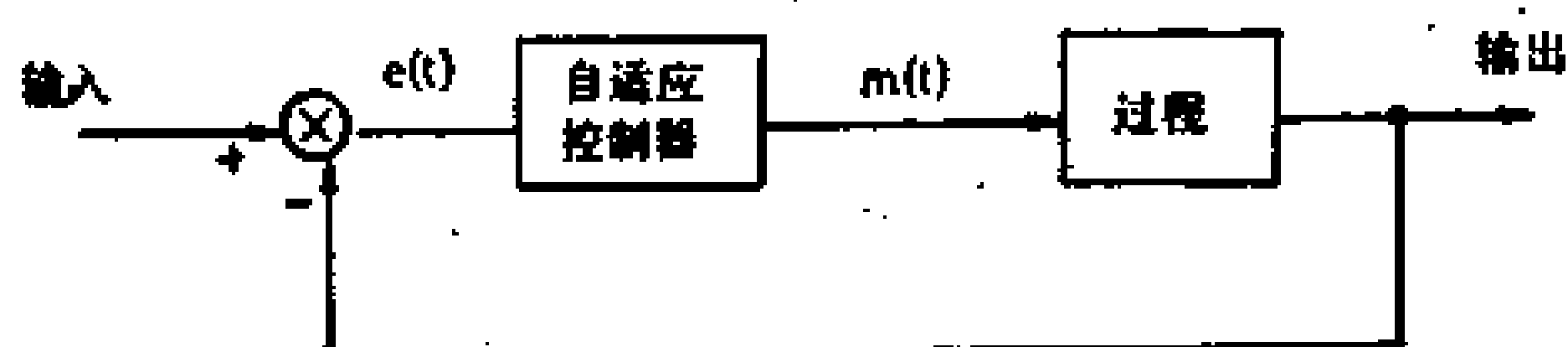


图 6.10 输入自适应系统

在这种系统中输出与输入进行比较，根据均方误差(或平方误差积分)为最小的原则，自动改变自适应控制器的参数和输出，从而产生出被控过程需要的输入信号 $m(t)$ 。这种自适应控制方式的一个重要特点就是它不需要参考模型。

4. 最优自适应系统。如图 6.11 示

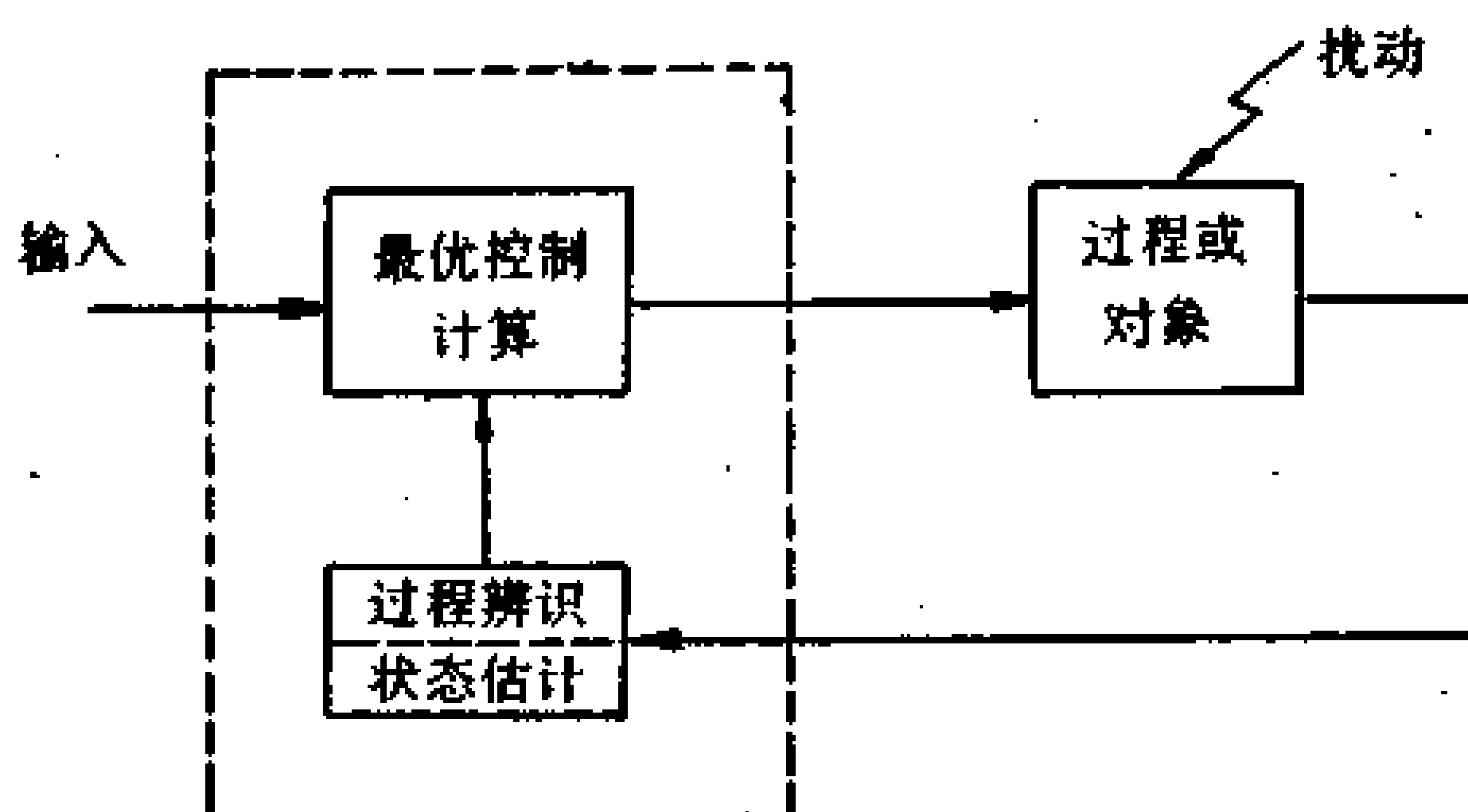


图 6.11 最优自适应系统

最优自适应系统,又称极值自适应系统。在这类系统中,为了使作为性能指标的某个函数为极大值或极小值,就必须根据系统的当时状态作出最优决策,综合地产生出必要的控制信号。由于过程的参数和状态往往事先不知道或不确定,所以需要随时进行过程辨识和状态估计,以提供关于系统本身的有关信息(即不断认识系统自己)。

三、自适应与自组织、自修复和学习

自适应系统应该具有自组织的特点。若在自适应部分,再引进具有“学习”职能的机构,这种系统就能运用过去“学习”到的“经验”,结合具体情况,以最优方式动作,那么这种系统就是比自适应系统更高一级的学习系统了。它在某些具体工作上,具有操作人员的工作能力和灵活性。自适应控制系统的重要性能之一,就是它具有可靠性。要保证系统是具有可靠性的系统,它就要能进行自修复,以便使系统性能得到恢复。

显然,自组织、自修复和学习是一些与自适应相关而又不同的概念。为了使一个控制系统具有这些功能,首先必须对这些概念进行研究和探讨。

关于这些概念,许多著名科学家象维纳、申农、艾什比以及后来的查德等人都作过研究,并取得了一定的成果。但首先发现自适应和学习这两个概念之间所存在的混乱,是科学家斯克兰斯基。他把学习和自修复定义为自适应的特殊形式。并且为了定量地研究这些概念,提出一个系统如果它是自适应的,那么就必须具有稳定性和可靠性这两个性能。下面我们可以通过由机器、环境和鉴定器(即 MEC)的组态图(图 6.12)来研究这些

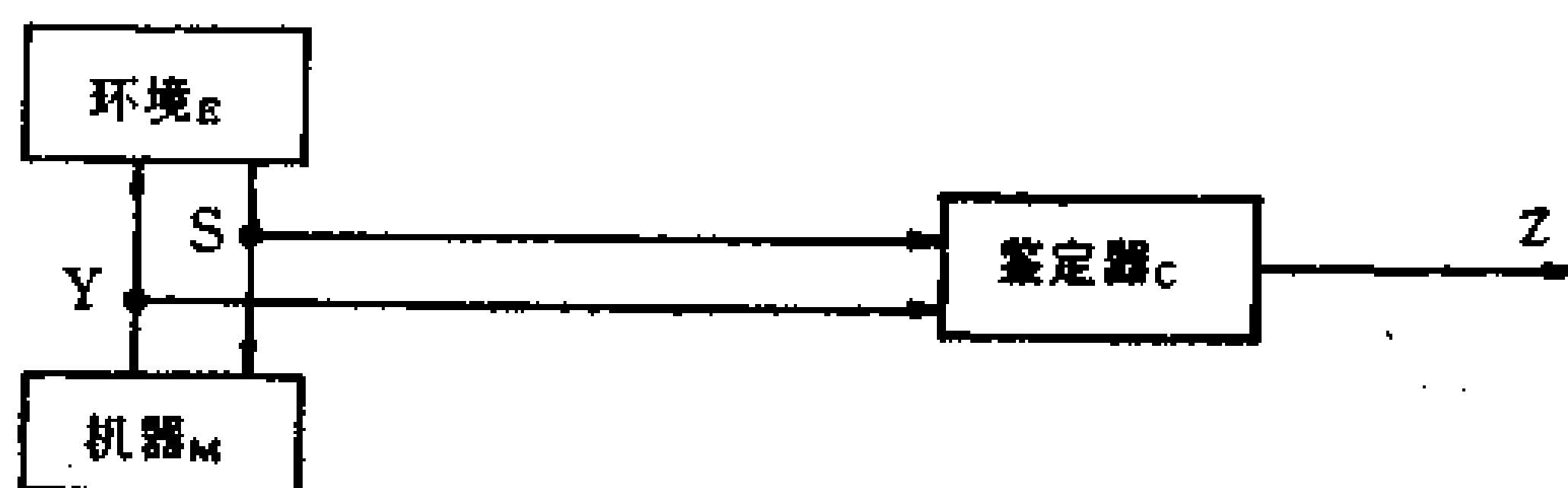


图 6.12 MEC 组态图

概念。

图中机器的输入为“刺激” S ，机器的输出为“响应” Y ，机器的成功量度由鉴定器的输出，或者由所谓“有效性”量度 Z 来给定。对于 MEC 组态有下面几种情况：

1. 当环境 E 发生变化而 M 不变化时，若 Z 保持在规定的范围内，则该系统是稳定的。
2. 当机器 M 变化而 E 不变化时，若 Z 保持在规定的范围内，则该系统是可靠的。

在这里，机器的适应性可由第一种情况来体现；也可由第二种情况来体现；或者由第一和第二两种情况（即 E 和 M 都发生变化时）共同来体现。

若当 $t=0$ 时，环境发生变化，在时间区间 $(0, T)$ 中环境保持不变，并且鉴定器的输出 $Z(T) > Z(0_+)$ ，就可认为机器在特定时间间隔 $(0, T)$ 中“学习”。这就是说，一个能进行学习的系统，若在 $t=0$ 时环境状态有一个给定的变化，则系统在时刻 T 时的性能指标一定高于 $t=0_+$ 时刻的性能指标。

若在 $t=0$ 时，机器的某些部件发生故障，且有 $Z(T) > Z(0_+)$ ，则认为机器 M 在时间间隔 $(0, T)$ 中经历了自修复。这就是说，当机器 M 中发生部件故障时，机器在 $t=0_+$ 时的有效性

量度低于 $t = T$ 时的有效性量度, 则就认为机器发生了自修复。

这里我们需要注意的是, 学习与自修复这两个概念之间的区别在于发生变化的物理场所不同, 一个在环境 E , 一个在机器 M 内的某些部件。在学习与自修复定义中, 要求在时刻 T 时, 性能指标 $Z(T)$ 应达到某个预定的水平 L , 即 $Z(T) = L > Z(0_+)$ 。学习与自修复系统, 在面临变化后的一个特定时间内, 系统性能 $Z(T)$ 必须达到一个给定水平 L , 而对于自适应系统来说, 则没有这种时间约束。

在前章已经从系统进化的角度阐述了自组织的途径和机制, 这里, 则进一步从系统控制的角度探讨自组织控制组态、判据以及与自适应、学习系统的关系。自组织概念是一个与环境有关系的概念, 因为一个系统由本身内部自行组织的自组织系统是没有的。它要成为有组织的系统, 就必须从它所处的环境中来提取这种组织性。若一个系统是有组织的, 则它就能通过一种自然选择的过程, 把那种与当前环境不相适应的行为抛弃, 所以只有当相对于某个外部有序源来定义一个系统时, 这个系统才能成为有组织的。若环境是无序的, 那么系统也就失去了自组织的基础。

人们给出了一个系统是自组织系统的判据:

$$H\left(\frac{dH_{\max}}{dt}\right) > H_{\max}\left(\frac{dH}{dt}\right)$$

这个式子表明, 如果一个系统的熵 (H) 和最大熵的变化率 $\left(\frac{dH_{\max}}{dt}\right)$ 之积, 大于系统最大熵 ($H_{\max}$) 和系统熵的变化率 $\left(\frac{dH}{dt}\right)$ 之积, 就可认为这个系统是自组织系统。

一个系统在发生组织之前,必定是无组织或组织较差的。若一个系统是完全无组织的,则该系统的行为的不定度最大,我们就无法知道这个系统对特定输入将如何响应。不过随着系统在学习并组织起来,该系统的行为就比较确定了。因此,我们可以认为当系统的起始不定度为最大或接近于最大时,即 $H \approx \text{最大}$ 时,一个自组织系统就可定义为这样一个系统:它是一个起始状态为未知变量,或者为随机变量,或者为无约束变量的自适应系统或学习系统。

对上述这些概念,弄清它们各自的含义,它们之间的联系与区别,我们就可设法在技术上去实现它们。如在一个自适应控制系统中,添加一些必要的设备,就可建造出一个学习控制系统。学习控制系统有一个很重要的优点,就是学习控制器能在它的存储器中建立起输入-输出关系集,并能利用这个数据集计算每个新的增益集,从而能构成控制对象的“模型”。据此,设计学习控制器所需的关于控制对象行为的先验信息,比设计自适应控制器所需的先验信息要少得多,这样从有效性来看,学习控制器所需的控制对象动力学的先验信息较少,就成了它的一个突出优点。当然,与自适应控制系统相比,建立一个学习控制系统,势必会增加控制系统的复杂性和造价,但它的这个上述优点,能够弥补这一不足之处。

第四节 信息与信号

一、信息与信息的传输

任何一个系统不论采用哪种控制方式都必须以信息为基础,其控制过程也就是信息的获取、加工和使用的过程。因此通信系统的一些基本概念也应是控制论中的基本概念。

关于信息这个概念的定义,历来是信息论研究的主要课题。但是,在实际生活中,不少人将信息、信号、消息这三个本来不同的概念不加区别地使用。它们作为一个科学概念,在使用上应严格地区别开来。可以说,消息包含信息,消息是信息的外壳。信号是消息或信息的载体,是发送消息的手段。信号是指某些物理过程,它的变化可以受到控制,而且可以通过某些介质进行传播。人们总是事先约定每一种信号代表某一种消息,然后按照这种约定去控制信号(即控制物理过程)的发生和变化,从而发出各种不同的消息。信号的种类越多,变化规律越复杂,它所能发送的消息也就越多,而有限种信号只能发送有限种消息。另外,人们利用这些物理过程在介质中的运动就把信号传播出去,在远方利用对这类物理过程敏感的器件完成对信号的接收。于是,按事先的约定,信号所代表的消息或信息就传送到远方。当信息通过信号传输时,同一信息可以通过不同的信号来传输。不同的信息,则又可以通过相同的信号来传输。

关于信息是什么的问题,目前仍未取得一致的意见。信息论的创始人申农认为,信息是用以消除随机不确定性的东西。这

实质上是他从信息的某种作用或功能来定义信息的。控制论的创始人维纳则认为，“信息是我们适应外部世界，并且使这种适应为外部世界所感到的过程中，同外部世界进行交换的内容的名称”。^① 还有人把信息理解为集合的变异度、事物的差异或关系，以及系统的有序性等等。

我们认为这些看法都从某些方面触及到了信息的本质。一般说，信息是物质的一种存在形式，它以物质的属性或运动状态为内容，并且总是借助于一定的物质载体传输或贮存。任何物质都具有作为信息源的属性，只要这一物质存在着，它就必然具有这一属性，必然向外发送信息。可以说它是物质最普遍的，也是最基本的属性之一，它标志了物质的存在。信息不仅可以标志物质现实的存在，还可以标志物质在历史上曾经存在过。在具有反馈通道的控制系统中，通过反馈通道，对系统的实际输出信号进行测定，并与目标值相比较，从中可以获取标志干扰源存在的信息。有人将直接观察信源物质所获得之信息称为直接信息，而通过对客体的描述，陈述所获得的信息，称为间接信息。不论是直接信息还是间接信息，它们都能为人们提供有关事物属性及其运动状态方面的知识。所以人们常常把它看成是具有知识秉性的东西。如果把信息与观察者（或接收者）联系起来，信息就有了新的性质，具有一定的层次性。即有了语法信息、语义信息和语用信息。其中语法信息回答的问题是：事物的运动状态是什么？语义信息回答的问题是：这种运动状态的含义是什么？而语用信息回答问题是：具有这种含义的运动状态对观察

^① 《维纳著作选》，上海译文出版社 1978 年版，第 4 页。

者有什么样的价值或效果？显然语法信息是最基本的，具有客观的本性。语义信息既有客观性的一面，即事物运动状态本身的实际含义是客观的，不以人的意志为转移的；同时，它又具有主观性的一面，即对事物运动状态本身的实际含义，不同观察者可能有不同的理解，有时甚至会对同一含义出现完全相反的理解。当然，这与观察者自身的状态、知识背景和理解能力等有关。如果观察者对信息的含义完全不能理解，那么这种信息对他来讲，也就谈不上有什么价值了。而且同一信息，对不同的接受者，会产生不同的作用、具有不同的价值。因为它与不同的观察者之间可能具有很不相同的利害关系，同时也与观察者的不同价值观念有关。

综上所述，概括起来信息具有以下一些重要的性质：

1. 信息不能离开物质而独立存在。它的产生、它的内容、它的传输和贮存都有赖于物质客体。
2. 信息的作用和价值，又受着接受者的主观因素的影响和制约。对于不同的接受者来说，它的作用和价值是不同的。
3. 信息可以被观察者（包括人、动物及人造的仪器设备）所感知、检测、识别、提取、传输、贮存、显示、分析、处理和使用。并能为众多的观察者共享用。
4. 它是决策的依据，控制的基础，管理的保证。

信息从信源出发通过信道一直传到接收端，这就构成了一般通信系统的模型，见图 6.13。

信息源（即信源）。它是信息的发送源，发出消息的起源。信源可以是人、机器、自然界的任何物体，各种社会集团或组织。因此信息的类别有许多种，在无线电与电视传播中，信息的幅度是

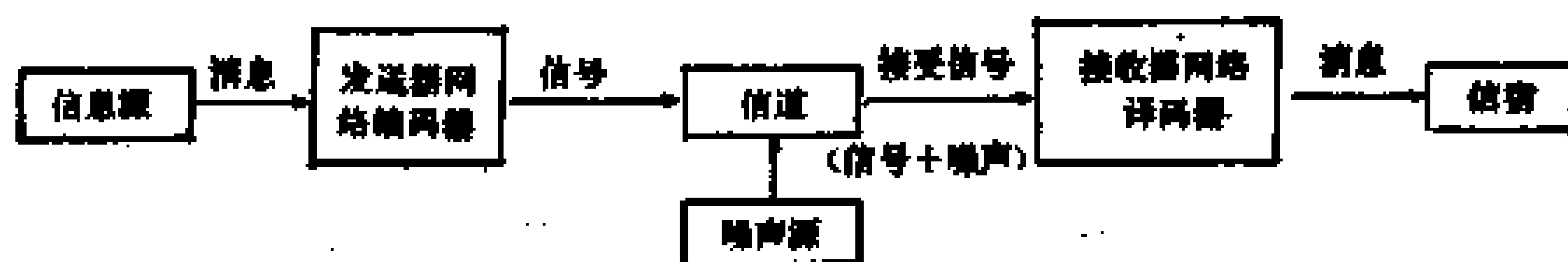


图 6.13 通信系统模型

时间的函数,电传打字机采用了字母的程序,银行支票则是采用字母和数字组成,等等。

发送机。发送机的功能是将消息转换成可以在通信通道上传输的信号形式,并对信号进行加工和处理。有的将这一转换过程称为编码。编码可分信源编码和信道编码。信源编码是对有剩余的消息进行无剩余或少剩余编码,以利于快速传送。信道编码是为了抗噪声干扰,往往还需进行有一定剩余的再编码,以利于可靠地传送消息。

信号。它可以是电、声、光等各种形式。如在电传打字系统中,先将载有消息的字母转换成符号与间隔,符号以电脉冲传输,间隔则没有脉冲。在无线电发射器中则是把声波变为电信号,这些信号再调制成高频信号以电磁波的形式传播。

信道。是信号传送到接受器的路径或通道。它可以是有线通道、无线通道、自由空间、电离层等。如在无线电与电视传播中,它们的通道是空气、导线或光导波束。信号也能通过空气、水、或固体介质声波的机械方式传播。

噪声。是在特定信号传送过程中,系统内产生的或由外界混入的干扰。如果噪声是由人为因素所造成,它包括电机的点火系统和换流器,开关接触不良,荧光灯等。从理论上讲,这些干扰是能够完全消除的。因此通信理论不研究这类干扰问题。在系统外来的非人为干扰中,有可能是来自雷电或银河系的宇

宙辐射所造成的干扰。但后者又是射电天文学家所研究的信息源。由此可见噪声具有相对性，即在这里相对于传送的特定信号而言。对特定的情况和接收者，它是噪声源，如果情况变了，噪声源就可能变成了信息源。系统内产生噪声主要有两种成因，一是任何温度只要在绝对零度以上，物体中的电子均有随机的热运动。二是在真空器件中的电流或半导体器件内的越结电流中，均有统计起伏的变化。

接收器。接收器往往执行与发送器相反的功能，使消息得以重演。在通信中，这就是把信号译成语言所表达的思想内容，变换成原来的消息。

信宿。是信息的接收者，是信息传送的预定终端。收信者可以是人，也可以是机器，或者其它自然物等。

在上述一般通信系统模型中，需要研究三个方面的问题：

1. 技术上的正确性问题。即在通信中，如何将符号从信源正确地传送到信宿，其准确度有多大。

2. 语义学问题。从信源到信宿，传送的信号是否准确地表达了所应表达的意思，精确到什么程度。但目前由于它的复杂性还不能概括在通信的数学理论范围内。

3. 有效性问题。接收到的信息对一定的行为能否产生有效的影响，即接收信息如何能有效地按预定意图控制系统的行为。这种有效性问题与涵义的确切性问题之间又有着密切联系，两方面不可分割。例如，电力系统的控制中心通知它的次级系统——某一电厂，进行开机、停机或倒闸操作，若能正确理解通知的涵义，就能有效地动作，否则就会造成严重事故。关于第三方面的问题，更多的属于控制理论需要研究的问题，以便能有效

地控制对象的行为。

申农的信息理论只研究技术上的正确性问题，而撇开了后面两个问题。因为研究技术上的正确性问题，是研究信息问题的第一步，一个不能正确地传送信号的系统，是无法用来解决语义学问题和有效性问题的；而且，撇开后两个问题，也给工程技术上处理问题带来了极大的方便。

二、信息的测度和编码

1. 信息的测度。对通信进行定量研究的第一个要求是探讨在一个信息中包含信息量 I 的数学表达式。若假设 x 是一个具有概率 p 的消息，我们要找出一个测度 I ，来表示收到 x 时不确定性减少的量即获得的信息量。为此必须先决定信息容量函数

$$I = f(p)$$

若某一特殊信息的信息内容能表示为可能的消息数 n 的函数，则有

$$I = f(n) \quad (1)$$

若一个消息由两部分组成，每部分各有 n_1 和 n_2 的可能值。因总消息可由分部信息的任意组合而成，这样有 $n_1 \cdot n_2$ 个可能消息。总消息所包含的信息量必须等于部分之和，即

$$I_{\text{总}} = I_1 + I_2$$

其中

$$I_{\text{总}} = f(n_1 \cdot n_2)$$

$$I_1 = f(n_1)$$

$$I_2 = f(n_2)$$

故有

$$f(n_1 \cdot n_2) = f(n_1) + f(n_2)$$

能满足这一函数形式的只有对数函数。因对数函数有

$$\log(x \cdot y) = \log x + \log y$$

由此可推得(1)式为

$$I = k \log n$$

式中 K 为常数, 根据选用的单位而定。 n 为可能的消息总数。

假设有消息集合为

$$x = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_n \end{pmatrix}$$

在该集合中, 若每一消息出现的概率不等, 即 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 均不相等。 I 可表示为概率的函数, 即

$$I = K \log \frac{1}{p_i} = -K \log p_i$$

当出现概率相等时, 则有

$$I = -K \log p_i = -K \log \frac{1}{n} = K \log n。$$

若在概率不等的情况下, 第 i 个消息 x_i 有概率 p_i , 而 $P_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ 。在 n 个消息序列中, 这个消息应出现 $n \times P_i$ 次。当无干扰时, 从信源收到一个消息所获得的平均信息量则为:

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

此式即为计算信息量的公式, H 称为信息的熵。信息“熵”是从热力学熵的概念类比得到的。它表示通信系统中, 终端对信源端发出消息的不确定性或不肯定程度。 H 是概率的函数, 与消息 x_i 发出的次序无关, 即与 $P_1, P_2, \cdots, P_n$ 的排列次序无关。

若用二进位数字来计算信息量,并且对数就取 2 为底数, K 取值为 1,信息量的单位为比特(bit)。若对数取 e 为底数,则信息量的单位称为奈特(nit), $1\text{bit} = 0.639\text{nit}$ 。若需要传送由两个二进制数所组成的消息,有四种可能消息(00,01,10,11),每种都具有等概率,这样 $n=4$, $p_1=p_2=p_3=p_4=\frac{1}{4}$, $H=-\sum_{i=1}^4 p_i \log_2 p_i = -(p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + p_3 \log_2 p_3 + p_4 \log_2 p_4) = -(\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4}) = -\log_2 \frac{1}{4} = \log_2 4 = 2$ (比特)。

这里我们涉及的是离散信源,即发出有限数量的离散消息的信源。最简单的信源是发出由 0,1 两个符号形式的信息。如由符号 0,1 构成四种可能的消息,00,01,10,11。根据这些简单的信息源,只要增加字母符号,使符号具有不同的概率,并使连续的符号相互依赖,以及符号需要不等长的时间,就能形成复杂的信息源。字母符号沿信道传输时,它就变为消息符号,消息符号的重复发生便产生消息。当上述 0,1 两种符号组成四种可能消息,它们都具有相等概率时,熵是极大($H_{\max}$)。当它们不是等概率,其熵不是极大时,信息源的熵 $H < H_{\max}$,则 $H/H_{\max}$ 的比值是系统的相对熵或效率。如上例 00,01,10,11 的概率分别为 $\frac{1}{8}, \frac{3}{8}, \frac{3}{8}, \frac{1}{8}$ 时,则有

$$\begin{aligned} H &= -\sum_{i=1}^4 p_i \log_2 p_i \\ &= -\left(\frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} + \frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8}\right) \\ &= 1.41 \text{ (比特)} \end{aligned}$$

相对熵 $= \frac{H}{H_{\max}} = \frac{1.41}{2} = 0.705$ 。表示比 1 小多少的量, 即 $1 - \frac{H}{H_{\max}}$ 称为剩余度。如发一个电报, 内容简要到一个字也不能再减少时, 其剩余度就最小。在通信中, 剩余度很重要, 因为这个量能帮助我们用以分析和改善编码的效率。

2. 信道容量。信道容量可定义为: 一个或多个信息源可能产生的符号(每秒符号数), 并使他们在通道上以流通信息的极大率(比特/秒)而传送。这个“率”被定义为单位时间的比特数, 并可用公式来计量:

$$C = \frac{I}{T}$$

式中 C 表示信道容量, I 为信息源产生的单位消息的信息平均数量, T 是时间(秒)。

3. 传输率。当一信息源有平均信息容量为 I (比特数/秒), 信道容量为 C (比特数/秒), 则无误差的极大输送率不可能大于 C/I , 这是通信中信道的基本理论。

如, 有四种可能消息 A, B, C, D , 它们发生的概率分别为 $P_A = \frac{1}{2}, P_B = \frac{1}{4}, P_C = \frac{1}{8}, P_D = \frac{1}{8}$, 则单位时间每一消息的信息量为:

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{i=1}^4 p_i \log_2 p_i \\ &= - \left(\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \right) \\ &= 1\frac{3}{4} \text{ (比特/秒)} \end{aligned}$$

在通信信道中, 如果开关板上有四个开关分别为 A', B', C', D'

与一个操作者，若操作者每秒可操作一个开关，每秒可以送出一个符号，则前面业已证明，当四个消息具有等概率时，其信息量为最大值，即 $H = -\log_2 \frac{1}{4} = 2$ (比特/秒)。在这里与每一符号有关的信息为 2 比特，信道容量 $C = \frac{I}{T}$ 就受到操作者输送速度的限制。因此，可以把消息 A, B, C, D 编码成某一恰当的形式，使可能输送的信息率为

$$R = \frac{C}{1} = \frac{2}{1\frac{3}{4}} = \frac{8}{7} = 1\frac{1}{7} \text{ (符号/秒)}。$$

4. 编码。编码的定义是把消息转换成信号，它使消息的特性与通信信道相匹配。编码的过程就是要在信道的输送中产生一组独立而相等频率的符号，因此把编码器看作具有极大熵的信息源。如所产生的符号源有适当的速率，则可使信道容量得到充分的利用。仍以上述四个符号 A, B, C, D 为例，如信源发出每一消息的熵为 $1\frac{3}{4}$ (比特/秒)，其最大熵为 2 (比特/秒)，相对熵 $H/H_{\max} = \frac{7/4}{2} = \frac{7}{8}$ ，剩余度为 $1 - \frac{H}{H_{\max}} = 1 - \frac{7}{8} = \frac{1}{8}$ 。若已知最大传送率 $R = 1\frac{1}{7}$ 符号/秒，如能采取适当编码形式，使信道中每一符号熵为 $\frac{7}{4}$ 比特，它就等于信源的熵，这就是可能最有效的编码。

具体编码过程是，假定信源 x 可以发出 N_0 个不同的信号 (或符号)，即 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，将这组符号变换成另一组符号“码字”，即 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ，这一变换就是编码。如 x

为汉字符, $x = \{\text{信息论}\}$, 变换成 $w = \{0207\ 1873\ 6158\}$, 其中每四个数组成一个码字。而组成每一个码字的数字称为码元, 如 0, 2, 0, 7 就是四个码元, 它是组成信号的基本符号。码字中包含基本码元的数目叫做码字长度。数字通信中, 基本码元是二进制数字 0 和 1, 这叫二码制, 码字由 0 和 1 组成。如“信” $\rightarrow (0\ 2\ 0\ 7) \rightarrow (0\ 10\ 0\ 111)$ 用二进制数表示时, 每个单元为一码组, 即由一定数量 0, 1 码元组成信号为码组, 若干码组构成码字。

若 0 和 1 二符号占用时间一样长, 称为同价码。若每个码字由相同码元构成, 就叫等长码。当任意一个有限长的码字序列, 能被唯一地划分成一个一个码字, 则该码称为单义码。如

$$x = \{x_1\ x_2\ x_3\}$$

$$w = \{01\ 11\ 11\}$$

这不是单义码, 因为一组符号与另一组符号不是一一对应的, 在这里 11 同时对应 x_2 和 x_3 。而单一码必须一一对应, 而

$$x = \{x_1\ x_2\ x_3\}$$

$$w = \{01\ 11\ 00\}$$

就是单义码。

但当

$$x = \{x_1\ x_2\ x_3\}$$

$$w = \{0\ 11\ 00\}$$

这又不是单义码了, 因为当收到 0011 时, 码字序列 0011 划分成一个一个的码字不是唯一的。在这里 0011 可以被划分成 00, 11, 也可划分成 0, 0, 11, 这样 00 可以译成 x_3 , 也可译成 x_1 , x_2 , 所以它不是单义码。单义码是编码的重要要求, 它应是唯一

的可译码。

编码的好坏要从量和质两方面来要求和评价。从量上讲,要单位时间发出的信息越多越好。从质上讲,要有抗干扰能力,发出的信息可靠、准确。码的长短与概率有关,概率越大,字码要编得越短越好。

以上这些都是编码中应注意的思想方法和原则。

5. 信道型式。实际信道有三种形式,即无杂音离散型信道,有杂音离散型信道和有杂音连续型信道。

无杂音离散型信道,其基本理论是:消息可编码以 R 的传输率在信道中传输,其最大值为 C/I 。有杂音离散型信道的基本理论是:如传输率小于信道容量,可对在杂音信道上传输的消息编码,使接收器收到的信息有较小的百分误差值。杂音信道容量则被定义为杂音信道上的信息传输率 R 与输送信息量 I 的乘积,即 $C = R \cdot I$ 。传输消息组应使接受信息为极大。连续型信道中,信源输出是模拟量,如电压,电流,位移等。研究连续型过程通常采用对离散型的类比方法,即把模拟量取离散值。这一过程基于两个事实:一是几乎所有的传输信号都属于有限频带,① 它们不包括给定频率的频带外的分量;二是采样理论,其大意是具有型式为 $G(t)$ 的连续信号,它如没有高于每秒周数为 w 的分量,如在时间 $(t) 0, \pm \frac{1}{2}w, \pm \frac{2}{2}w, \dots, \pm \frac{n}{2}w$ 观察函数值,这一函数 $[a(t)]$ 可以完全被确定。因此,对连续采样的周期为 $\frac{1}{2}w$ 秒,即每秒采样数至少应为可能传输信息最高频率的两

① 频带指介于两个特定频率之间所有频率的一个连续范围。

倍。

熵的定义对连续型与离散型有所不同。离散型信号源描述每一符号的是概率；连续型则由特定的概率密度函数来表示。概率密度函数是信号幅值的计量。在连续型信道中，概率密度函数表示为 $p(x)dx$ 。

在离散型情况下，当所有符号具有等概时，信源的熵为极大。在连续型情况下，幅值具有正态分布的信号比其它具有相同平均交流功率的连续信号有更大的熵。如果：信号源受它平均功率的限制（平均功率为 S ），杂音是有限频带，“白色”^①不受信号影响（平均杂音功率为 N ），信道为频带宽度 w 所限制，那么，在上述假定的基础上，可以认为有极大平均功率 S 的信号的连续信号源（包括“白色”有限频带）的信道容量为：

$$C = w \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ 比特/秒。}$$

三、通信和控制中的统计规律

从信息量的计算中，已清楚看到信息量是概率的函数，它与统计方法有直接关系。维纳在他的控制论中，申农在信息论中都研究了统计理论和统计力学与信息的关系。可以说信息论就是通信的统计理论，是随机理论在信息和控制理论中的应用。随机理论是信息论和控制论的数学基础。

统计方法是研究偶然性问题的一种方法。它是建立在这样

① 信息论中的“白色”，是指在频率区的频带段，其概率密度函数的幅值为常数。

的直观基础上的，即一般说来，如果有某一类物理系统能持续地保持它的特点不变，那么几乎在任何情况下，其中每一个物理系统最终都会重复实现这类物理系统在任意给定时刻所具有的分布。也就是说，在一定的场合下，经过足够长的时间，一个系统就会遍历能量与其相一致的位置和动量的所有分布。这种思想首先被用来分析布朗运动问题。在这里热分子受随机因素的影响，其运动是无规则的。为了研究这类运动，引进了熵的概念。熵是统计概率的函数，是由概率来度量的。而熵的特性就是不断增加，随着熵的增加，宇宙中的一切封闭系统就会自然的退化，从有组织状态，有序状态，趋向于混沌的无差别状态。克劳修斯把这推广到了整个宇宙，提出了宇宙热寂死的观念。维纳认为，如果真是如此，那么当宇宙在整体上趋于寂灭时，却存在着一些同宇宙的一般发展方向相反的局部小岛，在这些小岛上存在着组织性增加的有限度的暂时趋势。正是在这类小岛上，生命找到了安身之处。控制论这门新科学就是以这个观点为核心发展起来的。所以维纳在机器和生命机体都具有的通信和控制的理论研究中，就确立了“这个理论的基础是几率性的”。他说：“灵敏自动机的理论是一个统计的理论。通信工程的机器，根据单独一次输入而产生的动作是不会使人感兴趣的。这种机器如果要能充分发挥作用，它就必须对全部输入都作出令人满意的动作。这就是说，对一类从统计上预期要收到的输入做出统计上令人满意的动作。它的理论应该属于吉布斯统计力学的范围，而不应该属于古典牛顿力学的范围”。^①

① 维纳：《控制论》，科学出版社 1962 年版。

这样一来，统计理论和方法不仅渗透到了物理学等学科中，也渗透到了控制和通信的理论中。在通信工程的场合，统计因素的意义是直接明了的。因为信源发出哪种消息也具有随机性和统计性的特征。信息的传递除非作为二中择一的事件的传递，否则是不可能的。如果只有一个偶然事件拿来传递，那么根本不发消息是最有效而最少麻烦的发送方法。电报机和电话机只有在它们所传递的消息，以不完全决定于其过去的方式连续变化的时候才能发挥它们的功能，也只有在这些消息的变化符合某种统计规律的时候才能有效地被设计出来。

正是为了概括通信工程中的这一情况，就建立和发展了关于信息量的统计理论。在这个理论中，单位信息量是对具有二中择一的事件作单一选择时所传出的信息。这个思想差不多同时由好几个科学家提出来。其中统计学家费希尔的思想是来自古典统计理论，信息论的创始人申农则来自信息编码问题，而控制论创始人维纳是来自电滤波器的噪声与消息问题的研究中。可见，统计理论和方法已经是信息和控制理论的基础和重要方法。现在这一理论和方法愈来愈被推广应用到了更大的领域，在许多社会经济和管理问题的研究中，得到了有价值的应用。不过这里要提请注意的是：在社会系统中，比较难以做好。因为系统本身复杂，而且还受着许多难以预测的随机因素的影响；要得到一个有用的社会统计资料，需要处于基本上稳定的条件下的长久的统计游程，但这点是很难实现的；加上还有许多人为因素的影响。所以这就要求我们在社会等复杂系统中，运用统计理论和方法时，特别要注意它的条件性。

第七章 系统分析

系统分析在系统科学的工程技术层次上占有十分重要的地位，它包括从目标分析、模型化、系统最优化到系统评价这一系列过程。它是系统设计的基础，又是系统决策的依据。

第一节 系统分析的概念和内容

一、系统分析的概念

“系统分析”，最早是由美国兰德公司在本世纪四十年代提出并使用的。1945年美国道格拉斯飞机公司，组织了各方面的科学家为美国空军研究“洲际战争”，其目的是向空军提出有关技术和设备的建议，当时称为“研究与开发”(Research and Development)计划。1948年5月，执行这项“研究与开发”计划的部门从道格拉斯飞机公司独立出来，正式成立兰德公司(RAND)。“兰德”的名称是英文“研究与开发”这两个词的缩写。兰德公司发展了一套对符合确定目标的不同方案从费用和效果两方面进行经济评价的方法，即系统分析方法。

战后四十多年来，系统分析沿着两条明显不同的路线发展着。一条路线是运用数学的工具和经济学的原理，分析和研究

新型防御武器系统。六十年代初美国国防部长麦克纳马拉把兰德公司的一套系统分析方法“计划—规划—预算系统”带到了华盛顿,从五角大楼推广到政府各部门。同时,美国的民间企业也开始应用系统分析的方法来改善交通、通讯、计算机、公共卫生设施的效率和效能,并在消防、医疗、电网、导航、炼油等领域得到广泛的应用。特别在航天技术领域应用系统分析取得的成绩更大。另一条路线是在大学和科研机构,把系统分析的思想和方法在一些研究领域逐步加以系统化、理论化。开始是在生物学和自动控制的研究领域,后来扩展到社会政治机构、国际关系、管理系统、生态系统、心理分析、教育系统等研究领域。随着受过系统分析方法专门训练的人员越来越多,这种方法的应用也就更加普遍。到了七十年代中期,系统分析从作为分析经济合理性的应用工具和作为分析研究对象的理论体系这种互相分离的状态,逐步互相结合、互相补充,发展成为一种有效的方法体系。特别是在解决有风险的和不确定性的经济、社会决策方面,系统分析提供了有用的信息,在改进决策系统的功能方面,发挥了重要作用。

对于系统分析,国内外学者有着各种不同的解释,名称也不尽然相同,有的书上用系统工程,有的则称系统研究,还有的就叫系统分析。系统分析发展到现在,根据它的性质和任务,可以把系统分析理解为这样的一个分析过程:就是对系统的目的、功能、环境、费用、效益等问题,运用科学的分析工具和方法,进行充分调查研究,在收集、分析、处理所获得的信息资料的基础上,确定系统目标,制定出为达到此目标的各种方案,通过模型进行仿真实验和优化分析,并对各种方案进行综合评价,从而为

系统设计、系统决策、系统实施提供可靠的依据。^①

二、系统分析的内容

系统分析的内容,通常包括系统的环境分析、目标分析和结构分析三个方面。

1. 环境分析

环境通常是指存在于系统之外的物质的、经济的、信息的和人际的相关因素的总称。环境同系统之间存在着相互依存的关系。系统的状态、系统的问题往往同环境的影响有密切的关系。因此,分析环境,了解环境与系统的关系是接近系统问题的必要步骤。环境的影响作用,主要表现为系统的输入发生变化;系统对环境的影响作用,主要表现在系统的输出发生变化。现实的系统都是开放的系统,它和环境之间的相互作用是不可避免的。环境的变化会对系统产生直接或间接的影响,确定系统的边界和约束条件必须对环境作出分析,而系统分析的许多资料也来源于环境。因此环境分析是系统分析的一项重要内容。

系统分析的环境因素包括三大类:物理技术的环境,包括现存的系统、技术标准、科学因素和自然环境;经济管理环境,包括系统外部的组织、政策、政府的作用,产品系统及其结构,经营活动等因素;社会人际环境,即更大范围的社会因素、人的因素等。

物理技术环境的分析,主要是弄清正在运行的现存系统的物理和技术状况和有关的知识,为系统分析提供资料依据。任何

^① 参见汪应洛主编:《系统工程导论》,机械工业出版社 1982 年版。

一个新系统的开发,都要考虑与现存系统相协调,比较和评价现存系统与新系统之间的技术指标、经济指标、使用指标、技术方法的先进性,因此,必须收集现存系统的功能数据、实验数据、材料成本、市场价格等,作为系统分析的依据。技术标准的要求,如汽车的耗油、发动机的额定功率等,是系统分析和设计的客观约束条件,必须予以明确。对于科技因素的估量,主要是科技的新成果、新工艺和新方法的进展情况,避免新系统在投产前就已过时。系统分析中掌握国内外同行业中的技术状态,对于提高新建系统自身的技术水平,增强竞争能力是必不可少的前提条件。自然环境的分析包括地理环境、气象环境、自然资源,以及自然因素对新建系统产生的影响和制约,同时也要考虑可能发生的特大自然灾害的影响。

经济管理环境的分析,主要是弄清新建系统所处的全社会经济运行过程的环境条件。一个新建系统总要同各类企业、用户单位、协作单位、咨询机构、上下级组织打交道,产生相应的对口关系。正确地掌握和处理这些关系,会对新系统的生存和发展产生重要的影响。政策是一类重要的经济和管理的环境,系统分析人员必须懂得政策对于系统的影响和威力。系统的分析应从政府的政策、法令、条例、章程出发,调整和建立企业系统内部的政策,包括资源、资金和人员的分配政策、预算政策、科研政策、信誉政策、专利保密政策、产品质量政策和行政管理政策等。经济和管理环境,还是系统开发产品系列、决定产品价格结构的基本出发点。经营环境是指与市场、用户有关的因素,要根据经营环境的变化,增强企业系统的实力,搞好经营决策,提高竞争能力。

社会人际环境的分析, 主要考虑人和某些社会集团的相关因素。通过对人口发展因素的分析, 可以估计产品的开发和服务方向, 制定交通邮电和图书发行规划, 预测未来系统开发的成功因素。研究城市的形式, 可以为城市的规划、建筑、交通、商业、供应、通信、供水、供电的系统分析和设计提供数据。人的因素对于系统分析也是必不可少的因素, 根据人的心理和生理局限性和工作效能, 调整人-机关系, 使其进行合理的功能分配。

总之环境因素的范围很广, 在系统分析中要因时、因地、因人加以分析, 找出相关的环境因素, 确定其影响的范围和程度, 在系统方案中予以考虑。

2. 目标分析

系统目标是系统分析和系统设计的出发点, 是系统所要达到的目的的具体化。目标分析的任务, 一是论证目标的合理性、可行性和经济性; 二是获取目标分析的结果, 即建立目标的指标体系。

系统总目标的建立, 一般有以下几种情况: 一是解决经济社会发展 and 国防建设所提出的新问题、新要求; 二是在系统目的已经明确的情况下, 从多种可能目标中选择较为合理的目标; 三是为改善系统自身的状态而提出目标。系统总目标的提出要有充分的根据, 总目标的制定应当稳妥, 有实现目标的具体方案作保证; 要充分考虑提出总目标可能产生的积极作用和消极作用; 要使总目标具体化, 在建立目标体系和指标体系时, 既要层次清楚, 又不忽略重点; 当各个目标发生冲突时, 要摆明矛盾、清理线索, 进行必要的调整, 不能掩盖矛盾。

3. 结构分析

系统的结构分析，是系统分析中的重要组成部分。对于一个复杂的系统，如果没有一个确定其合理结构的方法，没有一个考虑整体优化的方案，那么系统的分析和设计将无法进行，也会对系统的运行产生不良的技术和经济后果。系统结构分析的目的，就是要找出系统构成上的整体性、环境适应性、相关性、层次性的特征，使系统的组成要素及其相互关联在分布上达到最优结合和最优输出。系统的结构分析就是寻求系统合理结构的分析方法。上述思想可以用两个公式表达出来：

$$E^{**} = \max P(x, R, C)$$

$$P \rightarrow G$$

$$P \rightarrow O$$

$$S_{opt} = \max \{S | E^{**}\}$$

式中 X 是系统组成要素的集合；

R 是系统组成要素的相关关系的集合；

C 是系统要素及其相互关联在各层次上的可能分布形式；

P 是 X, R, C 的结合效果函数；

$P \rightarrow$ 表示这个函数对应于某种条件，如 $P \rightarrow G$ ，表示 P 函数对应于系统目标集的条件， $P \rightarrow O$ ，表示 P 函数对应于环境因素约束集的条件；

E^{**} 表示 P 函数在两个对应条件下所能得到的最优结合效果；

S_{opt} 的关系式表示具有最佳结合效果的结构中能给出最大输出的系统。

系统结构分析的任务，就是寻求 X, R, C 之间的最优结合形式，使系统在给定条件下结合效果最优，系统输出最大。为

此,除了分析系统环境、系统目标的因素外,在系统结构方面,要分析系统的集合性、相关性、层次性和整体性等关系,用分析和综合的方法求得结合效果最佳、输出最大的系统。

系统要素集的确定,是在分解系统总目标的过程中达到的。当总目标分解为不同的分目标和子目标时,系统的要素也相应的产生;目标体系所对应的系统要素集,是各个子目标的功能单元的实体部分的集合。但是,每一个子目标对应的功能单元不只一个,因此要借助于价值分析从中选取成本最低的功能单元,这样就可以得到满足目标集要求的系统要素集。

系统的特性不仅取决于构成系统要求的质量和合理性,而且还决定组成要素之间的相互关联,因此,要进行系统的相关分析。系统的相关性可能表现在系统要素的空间结构、排列顺序、时间序列、数量比例、相互作用、信息传递以及操作程序、管理方式等方面,这些关系构成了系统的相关关系集。系统要素之间最基本的关系是二元关系,其他更复杂的多元关系,是在二元关系的基础上发展的。在分析系统的二元关系时,可用相关分析表得到(见表 7·1)。

二元关系 要素	X_1	X_2	...	X_j	...	X_n
X_1	R_{11}	R_{12}	...	R_{1j}	...	R_{1n}
X_2	R_{21}	R_{22}	...	R_{2j}	...	R_{2n}
⋮	⋮	⋮		⋮		⋮
X_i	R_{i1}	R_{i2}	...	R_{ij}	...	R_{in}
⋮	⋮	⋮	...	⋮	...	⋮
X_n	R_{n1}	R_{n2}	...	R_{nj}	...	R_{nn}

表 7·1 系统要素二元关系分析表

当 $R_{ij} = 1$ 时,表明要素 X_i 和 X_j 之间存在二元关联;当 $R_{ij} = 0$ 时,表明要素 X_i 和 X_j 之间不存在二元关联。同时也要分析二元关联的性质及变化对系统分目标或总目标的影响,使二元间关联保持在最优的范围。

我们知道,系统的结构是分层次的。每一层次执行一定的功能,各层次功能的结合,实现系统的总目标。对系统的结构进行层次分析,首先是要解决系统分层及其规模的合理性问题。层次的划分要考虑到系统传递物质、能量、信息的效率、质量和费用等因素。如果一个组织管理系统的层次过多,会使传递周期延长,效率降低,费用加大;反之,如果层次过少,会使每一个层次的幅度过宽,难于集中和控制。其次是要使各个功能单元的层次归属合理。例如,在管理系统中,会计师、检查员归属于那个层次关系很大,一般地说,监督与检查功能不应放在同一层次内管理。同样,在技术系统内,控制功能必须放在执行功能的层次之上,否则难以发挥控制的功能。

三、系统分析的适用范围

系统分析开始应用于改善武器装备系统,接着在企业的经营管理、经济社会的发展中作为决策的工具。随着经济社会系统愈来愈复杂化,系统分析的作用更加突出了。1972年由美、苏、英、法、民主德国、联邦德国、日本等国的科学院和其他相应的学术团体倡导,在奥地利首都维也纳的郊区克拉森堡,成立了国际应用系统分析研究所,以通过国际合作的办法采用系统分析方法研究解决现代社会所面临的全球问题。

系统分析的适用范围很广,它研究的主要问题是使系

系统的整体效应达到最优化。在系统开发的全过程中，系统分析的质量对系统决策的有效性起着主导的作用，它可以帮助决策者统盘筹划，分析利弊，寻找最佳的计划、方案。

系统分析在经济管理上的适用面是很广的，主要包括以下几方面：

1. 制定经济发展规划、计划。对于各种资源条件、统计资料、生产经营目标等方面，运用规划论的系统分析方法求解优化方案，再综合其他相关因素，在保证系统协调一致的前提下，对系统的输入和输出进行权衡，从这些优化方案中选择一个比较满意的规划和计划方案。

2. 重大工程项目的组织管理。对于工程项目的各个部分，运用网络分析的方法进行全面的计划协调和安排，以保证工程项目的各个环节密切配合，保质保量地如期完成。

3. 厂址选择和建厂规划。新建一个工厂应对各种原材料的来源、技术条件、交通运输、市场状况、能源供应、生活设施等环境条件，运用系统分析的方法论证技术上的先进性、经济上的合理性、建设上的可行性，以选择最佳的建设方案。

4. 新产品开发。设计新产品时要对新产品的使用目的、技术结构、用料、价格等因素进行价值分析，以确定该产品最适宜的设计性能、技术结构、用料选择和市场能接受的价格水平。

5. 组织企业的生产布局和生产线。在生产组织方面为求得人员、物资、设备等各种生产设施所需要的空间，进行最佳的分配和安排，使之有效地组合和安全地运行，达到较多的劳动生产率，取得较高的经济效益。

6. 编制生产作业计划。运用投入产出分析法,搞好各种零部件的投入产出平衡与生产能力平衡,确定最合理的生产周期、批量标准和在制品的储备周期,并运用调度管理安排好加工顺序和装配线平衡,以实现准时生产和均衡生产。

7. 库存管理。应用经济批量模型,制定最优储备点和进料点,压缩原材料与在制品占用的资金,降低生产成本。

8. 资金成本管理。对生产费用进行预算控制,对生产过程中进行的技术改造和技术革新措施,进行成本盈亏分析,然后决定采取一种经济合理的措施或方案。

9. 质量管理。运用工程能力的指数、排列图、因果图和管理图等方法,进行质量分析,提高工程质量的可靠性,控制产品的质量。

系统分析方法在解决上述经济发展方面是很有成效的,同时在解决区域性、甚至全球性的经济社会发展问题上,也取得了一定的成效。但是任何一种方法都不是万能的,系统分析的方法也有一定的局限性,过去许多系统分析专家期望用这种方法能够解决现实世界中的一切问题,过分依赖于技术性的定量化分析方法,而忽视在处理信仰、政治、文化、传统等方面超出系统分析范围以外的东西,结果导致了許多挫折。这是必须注意的。

第二节 系统的目标

一、确定系统目标的依据

系统的目标是依据系统存在的问题来确定的。搞清系统存

在的问题是确定系统目标的重要依据。

系统的问题是多方面的,如企业亏损,产品积压,质量低劣,施工拖期,交通事故,军事失利,环境污染等,偏离了人们期望的系统状态,出现了问题;又如开发资源,开办企业,开发产品,修建工程,修通道路,绿化荒山等,人们所追求的系统状态与现实有一定的距离,也是问题。总之,问题是人们所期望的系统状态与实际状态之间的差距。系统分析,首先要抓住系统存在的问题,区别轻重缓急,从中筛选出那些对全局有重大影响的问题,作为系统分析的起点。

确认系统的问题要作多方面的分析和研究工作。第一要对系统问题的性质、特点、范围等给予确切的说明,划定系统问题与周围环境的界线,这通常包括问题的含义、发生的时间、地点以及问题影响的范围。这个过程也叫做问题的界定或问题的概念开发。比如某厂的产品质量不好,急需解决,那么就应当进一步搞清楚,是某一种产品质量不好,还是各类产品都不好;是原来产品质量不好,还是从某个时候质量下降;是各道生产工序的质量不好,还是某一个环节的质量不好;质量不好对企业的生产、经营活动有多大影响等。只有搞清了这些因素,才能对系统中的问题有一个清晰的理解。第二,分析系统存在的差距,把问题加以定量化的描述。为了确定系统存在的差距,可以把该系统和同类的其他系统加以比较,或者同该系统过去的历史状态或发展趋势加以比较。找到了系统的差距,便于对系统的问题进行定量化的分析。在系统运行过程中,小的偏离是不断发生的,只要这些偏离不超过所允许的数量界限,就可以不必付出一定的代价来缩小或消除这种差距。第三,要分析产生问题的原

因,揭示问题的因果关系,把握问题的实质。系统的问题是通过现象表现的,容易观察到,而问题的原因是隐蔽的、复杂的,分析原因要有正确的思维方法,小心谨慎地运用资料信息。原因的横向分析,是对产生某一问题的各种可能的原因作出假定,从而加以分析比较和验证,去掉可能性很小的原因,挑选出可能性很大的真实原因,或者是从许多真实原因找出主要的原因。原因的纵向分析,是从问题的表面原因入手,追寻“原因的原因”,层层深入,直至找到最本质的原因。表面原因是直接表现出来的,容易发现。如发现某项产品的质量不好,经查找是机器转速不稳造成的,进一步查找发现转速不稳是电压不稳引起的,继续追查下去,电压不稳是可控硅自动稳压设备中的某个元件失效造成的,那么只要更换这个元件,产品的质量就会得到保证。问题的表面原因,一般不能作为确定系统目标的依据,因为它不能作为最终解决系统问题的依据。不过当系统的问题比较复杂,一时难于找到最根本的原因,或者即使找到了最根本的原因,也因条件的限制,暂时无法解决,这时也可根据表面原因确定“临时性的目标”或“适应性的目标”。

从上述分析可以看出,确定系统目标的基本依据,是对系统存在的问题有深刻的分析和清晰的理解。这要求在系统分析的过程中,对系统及其环境作周密的调查研究,收集有关的信息资料,分析问题的根源,预测系统未来的可能状态,找出系统的问题对自身和周围环境的影响。系统存在的问题搞清楚了,确定系统的目标就有了充分的依据和坚实的基础。

二、系统目标的约束条件

系统的目标要依据系统存在的问题和解决问题的需要来确定。这种需要反映了人们要求缩小或消除系统的现状与所期望状态之间的差距的主观愿望。确定目标不但要考虑这种主观需要,而且还要考虑现实的可能性。为此,应当分析实现系统目标的种种制约条件。如某工厂由于生产工艺落后,存在着生产成本过高的问题。为了解决这一问题,应当确立改革旧的生产工艺的目标。但是改革生产工艺还会受到许多条件的制约:改革生产工艺能否使生产系统相互衔接配套,保持均衡生产;工艺改革后能否保证产品的质量,满足社会的需要;改革工艺会不会增加环境污染,会不会降低安全生产,影响工人的健康;等等。这些条件就会对改革工艺的目标产生约束。确定系统的目标,就要分析众多约束条件,权衡利弊,寻求实际上可行的最佳方案。

影响现实系统的制约条件,有些是可控的因素,如企业的原材料、劳动力、资金、设备、技术等;有些是不可控的因素,如市场销售,自然环境的变化。系统分析要求对各种制约因素作全面的分析,把系统的目标主要建立在可控的因素上,以免系统的目标风险太大。但是,有时确定系统的目标也要冒一定的风险。

目标要有确定的完成期限。如果不预先规定出完成的期限,允许无限延长,那么再好的目标也是没有实际意义的。因为系统的发展是动态的,系统目标的价值包含着时间的因素。现代科学技术的发展日新月异,新的技术和产品层出不穷。代表七十

年代技术水平的新产品，到了八十年代就可能不再是先进的技术水平了，甚至会成为淘汰的产品。系统目标的完成期限，往往体现了目标的价值。当然完成目标的期限允许在系统运行的过程中因情况发生变化而作必要的调整，或者对系统的期限因不同的情况，有的规定得严格一些，有的规定得宽松一些，甚至允许有一个伸缩的时间范围，如三至五年、八至十天等。但是，没有期限的系统目标，是没有什么价值的。

系统目标的诸约束条件又是相互制约的。凡是有约束条件的目标，只有在相互满足诸约束条件的情况下达到目标，才算完全实现了目标，否则就不能算实现目标。例如，在不增加生产成本又要提高产品的质量的前提下发展生产，如果提高产品质量的过程中，增加生产的成本，就不能认为实现了目标。系统分析在确定目标的时候，必须严格地规定它的约束条件，目标是否可行，也要看它的约束条件是否可行。社会系统的结构很复杂，通常它的约束条件有以下三方面的可能性：一是系统运行中的资源、人力、物力、财力等条件的限制；二是颁布的社会法令、制度、条例、规章等限制性因素；三是系统的次要目标所应达到的起码界线，它对主要目标也起着约束作用。

系统目标应当定量化。系统目标可以定性的表述，也可以定量的表述。为了衡量系统目标能否实现有一个定量的标准，必须尽量使系统目标数量化。所谓目标的数量化，就是给系统目标规定出明确的数量界限。有些系统的目标本身就是数量指标，如产量、产值、利润、成本，只有规定它在一定的期限内所要达到的指标要求，或规定它的最低限度或幅度范围，目标才有了数量的界限。有些系统的目标，如产品质量、环境保护、社会组

织等问题,本身不是由数量构成的,这时衡量系统的目标是否达到就比较困难。为此,分析系统的目标就需借助于间接测量的定量化方法。以产品的质量来说,每种产品都有一套复杂的质量规格,有些技术性的要求,如外观、色泽、包装、可塑性等,只能用文字来表述,有些规格虽然可以用数量来表示,但一个产品规格很多,量度单位不同,很难把它们综合为一个或几个反映产品质量状况的数量指标。这时,常常采用间接测定法,即用产品的合格率、废品率、返修率等数量指标来反映产品的质量,并把这些间接的指标作为系统分析的目标。系统目标的数量化,不仅有利于衡量目标实现的程度,而且有利于运用现代定量化的科学分析方法和电子计算机的分析手段。

三、目标体系

系统的目标是人们所期望的状态。系统的这种状态需要由多种概念加以描述,其中每一个概念反映系统状态的某一个侧面,把这种描述概念加以定量化,就成为系统状态的一个指标。所以系统的目标状态,是由一系列的指标来描述的,它们构成了指标的体系,反映了系统的整体状态。例如,开发一项新产品,就要用它的技术性能、生产成本、质量、价格等一组技术经济指标来描述。这些指标在反映系统状态的特征方面不是等同的,而是有主有次的。所谓系统的目标就是从这些指标体系中挑选出来的、最能反映系统本质特征的指标。又如,2000年我国人口的状态仅用总人口数的指标来描述是不完全的,还应当有其他的指标,如人口平均年龄、人口自然增长率、人口平均寿命、人口老化指数、社会抚养指数、人口生育率以及反映人口质量的文

化程度、健康水平等指标来补充。系统的这种指标体系反映了系统的整体特性,体现了系统目标的全部价值。

系统的目标有着层次的结构。在系统的总目标之下常常有好几个层次的分目标,构成分层目标的体系。各个层次的指标相互联系、相互制约、共同反映系统的整体特征。例如,对于社会管理系统的目标可按图 7·1 所示层层分解。总目标可以分解为一级目标、二级目标等。这种分层目标结构的分析往往采用树状图,因此称之为目标树分析。

分层目标的原理说明,系统应当在总目标的指导下具体确定自己的分目标,这叫做“目标的落实”。分目标不落实,那么分系统就失去了分析的准则。在确定分目标的时候,不能离开总目标的指导,否则就不能对分系统有比较深刻的理解,分目标也往往要分解为更小系统的小目标,这样也就容易发现解决具体问题的途径和方法。

对于复杂的社会大系统,互相独立的目标往往不止一个,而是多个,有时这些目标之间还存在矛盾,这就构成了多目标的系统。例如,1982 年我国《关于定期公布主要经济效益指标的试行法》中规定了工业总产值及增长率、工业产品优质品率、每万元产值消耗的能源和降低率、工业企业产值利税率、工业企业全员劳动生产率和增长率等十五项指标。一个企业的经营效果,要用多目标的指标体系来衡量。企业要根据自己的经营现状,妥善地处理多目标的关系,以改善企业的经营状况。对于多目标系统的分析,要遵循两条原则:一是在满足系统决策要求的前提下,尽量减少目标的个数,合成单一的目标,或删除一些从属的、次要的目标,或者把那些不需要优化的目标改为约束条件。

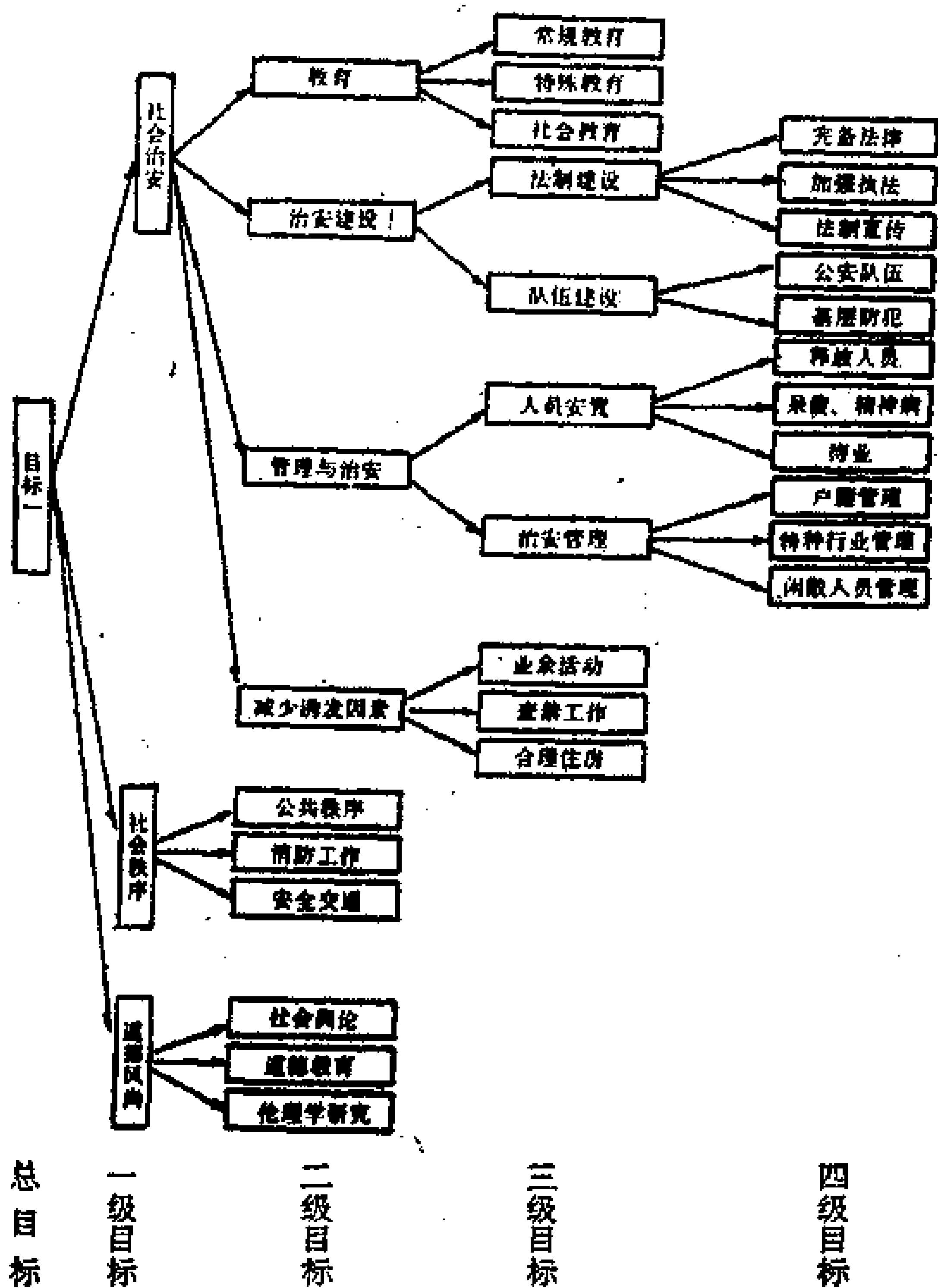


图 7.1 系统分层目标结构图

也可以通过合成、平均的方法，把多目标系统形成一个单一的综合目标。二是分析各目标的重要性，区别“必须达到的”和“期望达到的”两类目标，按照轻重缓急排列顺序，在系统分析的过

程中进行目标选择，首先对主要目标进行分析，筛选决策方案。

四、目标的协调与重审

系统目标的分析和建立，有许多情况下不是一次完成的。在系统分析时，常常会遇到随系统开发全过程的展开，出现与原来目标偏离的情况，这样在分析的过程中可能会改变原先形成的一些观点和思路。出现这种情况要作具体的分析，如果原来的目标仍然是正确的，那就要对系统开发的决策方案作局部的调整，使其更好地实现决策目标；如果调整方案仍然不能解决问题，那就要对系统目标进行重审、对目标进行修正。

第三节 系统模型化

一、系统模型的概念

模型，通常指的就是原型的样本，是对现实系统的描述和模仿。系统的模型是依据对系统的内部结构和外部环境的分析，按照系统的目标要求，用一种数学的或逻辑的表示式，从整体上反映系统的主要组成部分和各部分的相互作用、系统与环境相互关系的模拟手段。

运用模型来描述系统和系统的行为，要对现实系统作某种简化，突出其主要部分，略去次要部分，集中反映系统最本质的特性，或者反映人们最关心的系统的功能要求。系统的模型化表示方法，同直接对现实系统的描述方法相比，有许多实际的优

点：它可以节省大量的费用，可以节约时间，同时还可以减少许多风险等，因而它是系统分析中一种有效的工具。

在运用系统模型的过程中，特别应注意兼顾系统模型的精确性和简单性两方面的要求。所谓精确性，是指系统的模型要充分反映现实系统的基本特征；所谓简单性，是指系统的模型要尽量略去次要的或可以忽略的因素使模型本身简明，易于处理。但是，这两方面的要求，有时是矛盾的。在建立模型的过程中，为了使模型更接近现实往往会把许多关系不大的因素，纳入系统模型之中，使系统的模型变得复杂起来。而为了简化模型，又往往会把系统中的一些重要因素忽略掉，使模型的精确性降低。建立一个好的系统模型，应当把它的精确性和简单性同时兼顾，很好的结合起来，这不仅是一种科学的方法，而且也是一种创造性的艺术。如果为了简单性牺牲了精确性，或为了精确性牺牲了简单性，这样的模型都不能认为是一种好的模型。

构成模型的要素，主要有四个部分：1. 模型的成份，它是对组成系统各部分的模拟。系统的模型化过程，首先要选定系统的成份。2. 模型的变量，包括外部变量、状态变量和内部变量。变量是对系统各组成部分之间关系的描述。外部变量是模型的输入变量，它反映了系统与周围环境的关系，与系统模型本身的结构没有直接关系。外部变量可以划分可控变量和不可控变量两种，前者反映系统与环境之间可以人为控制的关系，后者描述系统与环境之间不可人为控制的关系，相当于模型的干扰变量。内部变量是模型的输出变量，它是根据模型的外部变量、状态变量和系统的工作特性确定的。对于一种变量来说，究

竟是外部变量、状态变量，还是内部变量，这要取决于系统的边界在什么地方。3. 模型的参量，它是表示系统特性的变量系数。模型确定后，参量一般为常量；参量改变，意味着模型的性质发生改变。4. 模型的函数关系，它是对模型各变量间相互关系的一种描述。这种函数关系一般可分为恒等式和函数方程式两种，前者多属于经济分析模型，如经济效益 = 经济收益——经济支出；后者又分为静态函数方程式和动态函数方程式。经济模型的函数关系，多是反映生产关系、消费关系和投资关系的静态特性；而控制系统模型的函数关系，多是反映各变量随时间而变化的动态特性。

在系统分析中，通过模型化，就可以对系统进行解剖、观测、计量、变换、试验，掌握系统的特性和各个要素之间的相互关系，从而作出正确的决策。特别对于一个复杂的实际系统难以直接描述时，利用模型的方法描述就很方便。但是系统的模型化，要根据不同的对象和不同的要求，灵活选用不同的模型。

二、建模的一般原则和步骤

建立系统的模型，是系统分析过程中最重要的阶段。一般说来，应当遵循以下原则：

1. 关联的整体性。一个系统是由许多子系统组成的，系统的模型必须反映各子系统及过程之间相互关联的整体性。通常用框图之间的联系来表述这种整体性。例如，一个工厂系统，就可以用图 7·2 所示的方框图来表示各部分之间的联系。

这一框图中，通过模型从整体上把非常复杂的系统的内部和外部关系表示出来，变成可以抽象、加工、推理和准确计算

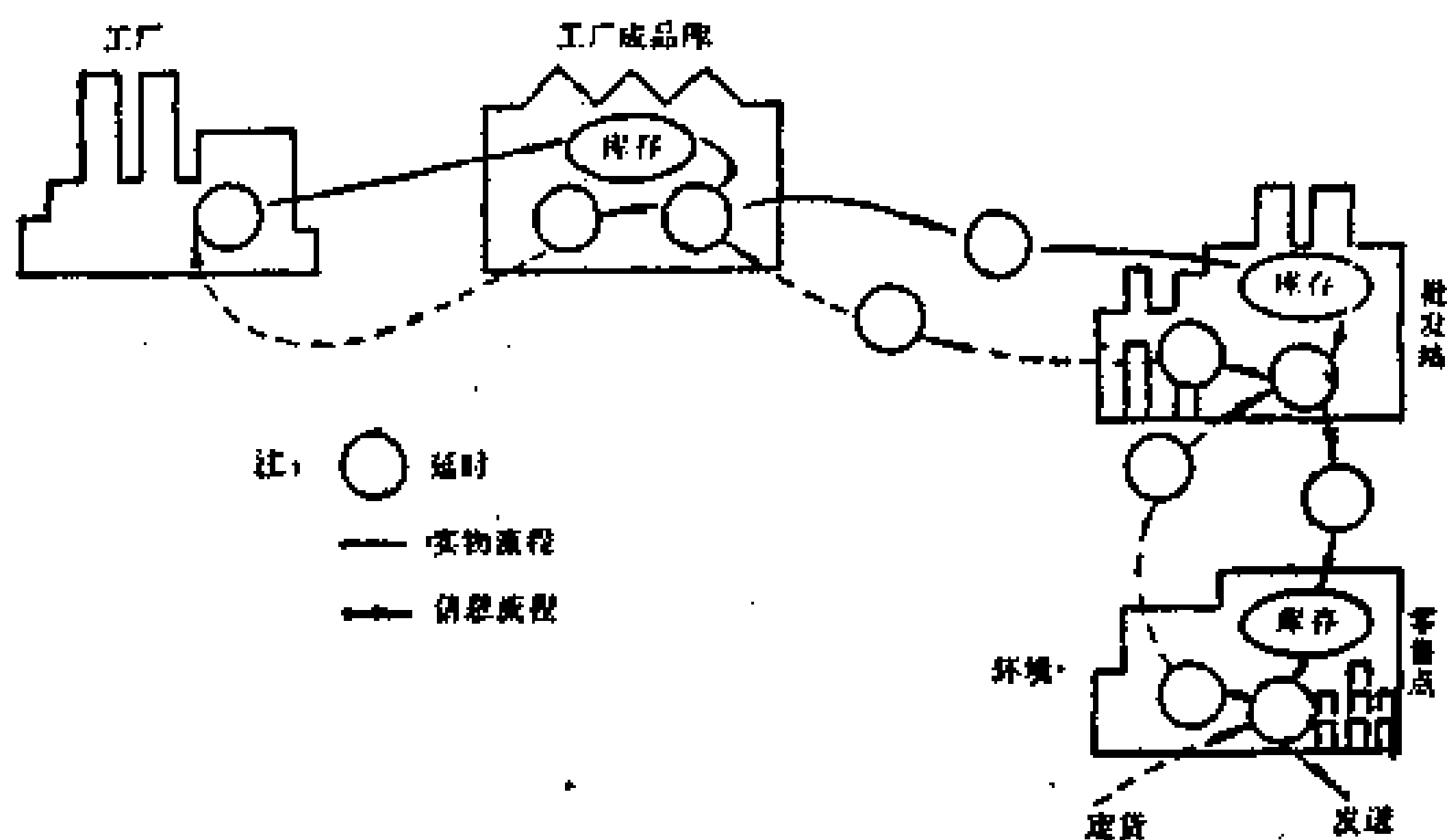


图 7.2 生产销售动态系统图式模型

的关系。

2. 信息的相关性。所谓信息的相关性，是指在系统的模型中只考虑吸收与系统分析的项目有关的信息，排除那些与系统分析项目无关的信息。例如，在工业管理中，建立工艺流程的模型，分析生产效率时，就不必考虑工人的工资因素。虽然，把与分析项目无关的因素吸收到模型中来，对分析结果不会有什么坏处，但是这样做会增加模型的复杂性，给分析工作带来许多不必要的困难。

3. 数据的可靠性。为了对系统进行准确的描述，建模时，收集的数据和有关信息必须准确可靠，如果数据不准，信息失真会给分析结果带来很大的偏差。

4. 系统的相似性。模型必须与被模拟的系统有某种程度的相似性，或者几何形式，或者数量关系，或者结构功能，或是其它属性、特征相似，这是建模的基础。许多模型之所以失效，许

多“典型”之所以垮台，都是因为它缺乏同实际系统的相似性，所以可用、可信度差。

建立系统的模型，由于目标和采用的手段不同，建模的步骤也有差别，很难给出统一的严格步骤。但一般建立系统的模型有以下基本步骤：

1. 明确建模的目的和要求。系统的模型是达到目标的手段。目标不同，模型的选择也就不同。建模要适应系统目标的要求。例如，为了达到系统的最优设计，要选用有最优解的模型；为了分析掌握行车的交通事故，需要建立系统行为模型；为了验证经济社会发展战略规划，需要建立系统预测模型；等等。有时为了适应系统目标的要求，还需要明确以什么样的精度来模拟现实系统的各个部分和各个动作。

2. 选定模型的成分和变量。根据目标和要求，通过收集和整理有关的数据，分析系统的组成成分，确定系统的变量个数、变化范围和输入的信息。如果模型的输出变量过少，会使模型失去效用；如果输出变量过多，又会使系统的模型变得十分复杂。对于复杂的社会系统，要抽象出模型的变量是很困难的，这就要依靠集体的智慧，发挥高度的创造性思维。

3. 建立概略模型。概略模型是反映系统整体的结构模型，这种模型用来表示各变量之间的联系程度，是反映系统本质的模型。概略模型通常是用流程图、表示相互关系的矩阵、相关树图表来描述的。系统越复杂，越是需要从整体上把握，概略模型就越显得重要。

4. 子系统的模型化。建立系统的概略模型之后，要将概略模型分割为各个子系统，并对每个部分分别进行模型化。模型

的分割可以根据图解的方法有系统地进行。在进行子系统的模型化时,可以选出表示系统状态的状态变量,并确定该系统输入变量和输出变量之间的函数关系式。

5. 建立全系统的综合模型。子系统的模型确定以后,可以根据系统概略模型的结构,把子模型综合为全系统精确模型,即定量地描述系统各变量间的关系,估计模型中的参数,用数量表示系统中的因果关系。

6. 对模型进行实验研究。系统的模型初步建立以后,就需要利用计算机或实物进行实验。这时要依据实时处理的必要性、人机关系特性、经济合理性和模型的精度要求等目标,选择计算机或实验装置的类型。实验的目的是了解所建模型的性质是否符合建模的目的和要求。

7. 评价实验结果,修改模型。根据评价标准,对模型反复进行实验,分析比较实验结果,并对模型进行必要的修正和完善。

三、常用的几种系统模型

系统分析中常用的模型有结构模型、网络模型、状态空间模型、系统动力学模型、线性规划模型、计划评审技术模型、投入产出模型、经济计量模型等。由于其中许多模型已在本书有关章节中作了概述,所以这里只简要介绍结构模型、投入产出模型、经济计量模型。

结构模型

结构模型是表示系统各单元间相互关系的宏观模型。用图的形式来表示系统中的这种关系是很简便的。设一个系统由 5

个单元组成,分别用点(或圈) p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 代表。如果一个单元对另一个单元有影响,则用带箭头的线段连接起来。于是,这种表示方式就构成了有向图(图 7.3)这种图示的方式,无论在工程技术系统还是在社会经济系统都是很方便的。

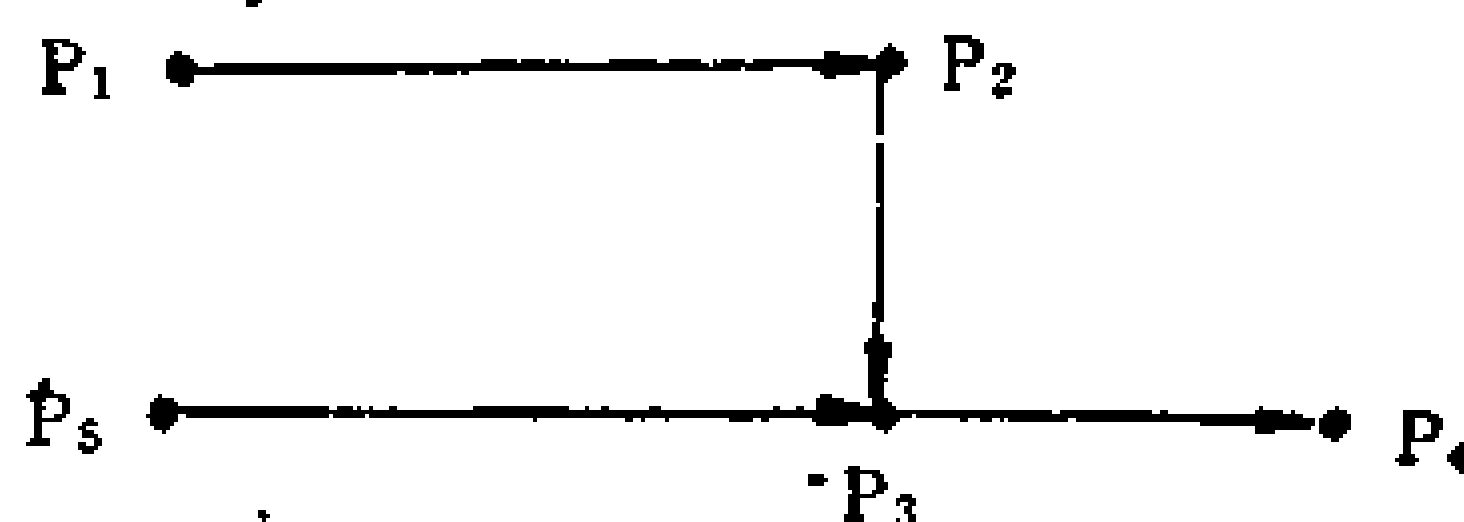


图 7.3 系统有向图

我们可以将上述有向图变换为对应的邻接矩阵 A 来表示。矩阵的元素 a_{ij} 为 1 时,表示系统单元 p_i 对 p_j 有作用,其作用的方向由 i 到 j ;当 a_{ij} 为 0 时,表示单元 p_i 与 p_j 之间无任何作用。例如,上图中 a_{23} 为 1,表示 p_2 对 p_3 有作用; a_{52} 为 0,表示 p_5 对 p_2 无作用。

对于由 n 个单元组成的系统($p_1, p_2, \dots, p_n$),则邻接矩阵为:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A = [a_{ij}]$$

邻接矩阵有如下特性：(1) 全零的行对应的点为汇点（无线段离开该点），即系统的输出单元，如 p_4 ；(2) 全零的列所对应的点为源点（无线段进入该点），即系统的输入单元，如 p_1, p_6 点；(3) 对应于每点的行中的 1 的数目就是离开该点的线段数；(4) 对应于每点的列中的 1 的数目就是进入该点的线段数。这些特性表明，邻接矩阵表达了系统各单元间的直接关系。若该矩阵中第 i 行、第 j 列的元素为 1，则表明从点 p_i 有长度为 1 的路到达 p_j 。实际上邻接矩阵描述了结构模型中各点间通过长度为 1 的路的可达情况。对邻接矩阵进行某种运算，可以得到有关系统的更多的信息。若在上述矩阵 A 上加单位矩阵 I ，则

$$A + I = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$A + I$ 描述了各点间径长度为 0 和 1 的路的可达情况。同样 $[A + I]^2$ 描述了各点间径长度不大于 2 的路的可达情况。我们把矩阵

$$R = [A + I]^r, \quad r \leq n - 1$$

称之为可达矩阵。可达矩阵的元素全为 1，则表明图中的任何一点可以到达其他各点。可达矩阵有一个可以转移的重要特性，即若点 p_i 可达点 p_j ，点 p_j 又可达 p_k ，则 p_i 必可达 p_k 。

在建立系统的结构模型时，应根据对系统各部分的了解和调查所形成的关于系统结构的知识（又称意识模型），输入计算

机构成相应的邻接矩阵或可达矩阵，经过计算机处理后可得到系统的结构模型。结构模型的建立，需要用人机对话的方式经过多次迭代、不断修正，才能实现(图 7·4)。对比较复杂的经济社会系统，容易知道各单元间有无关系(不论是直接的或间接的)，可达矩阵比较容易得到。

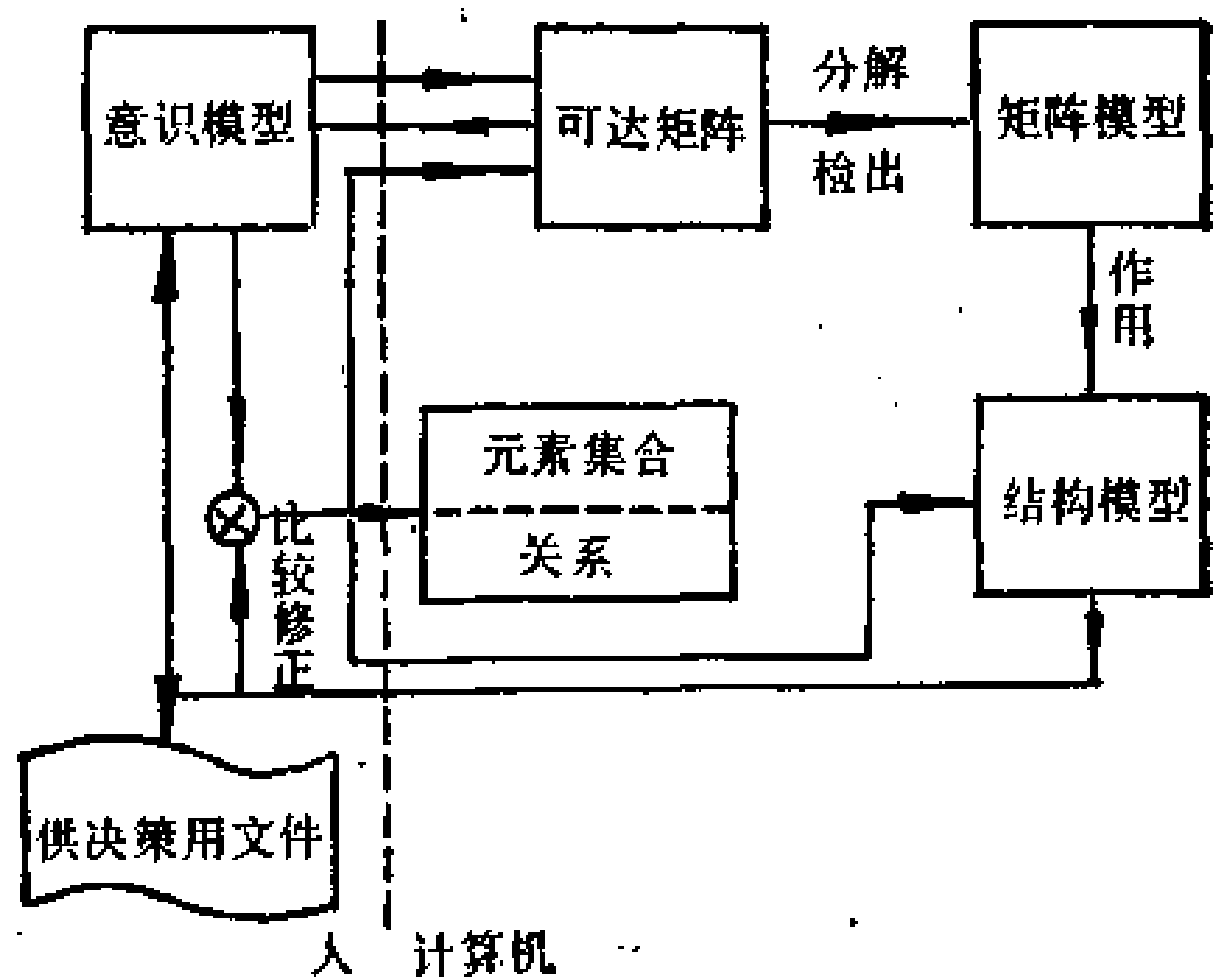


图 7·4 建立结构模型示意图

投入产出模型

投入产出模型是经济系统分析中常用的方法。社会经济系统是一个非常复杂的系统，各部门之间相互联系，相互依存。例如工业生产系统，一个部门生产出来的产品卖给另一部门；另一部门接着加工这批产品，然后又卖出去；直至成品最终到达消费者手中才告结束。决定一个生产部门的产值的因素是很多的，但主要取决于社会的需求。当然，消费者对产品需求量的增加，并不意味着工业部门的产值只相应地增加这么多，因为为了增

产这么多产值的工业品,必须从本部门消耗一部分工业产品。例如,增产汽车,就需要从工业部门得到钢铁、橡胶等工业产品,而且需要从农业、服务业相应得到更多的投入。虽然消费者对这些部门的需求并没有增加,但为了支持工业产品的增产,它们的产值也必须相应增加。上述工业生产系统实际上是一个动态反馈控制系统。如果用 X 表示产品总输出量的变化率(即生产率), Y 表示供应量的变化率, D 表示需求量的变化率,生产系统需要消耗的一部分用 AX 来表示(A 是比例系数),那么,市场的供应率 Y 则等于 $(X - AX)$,用供求率之差($D - Y$)作为控制变量,来控制生产率的增长率 $\dot{X}$,这样就可以建立一个投入与产出的数学模型 $\dot{X} = F(D - Y)$,其中 F 为比例系数, X 与增长率 $\dot{X}$ 是积分关系。生产系统的这种控制过程的模型也可以用方块图来表示(图 7.5),①

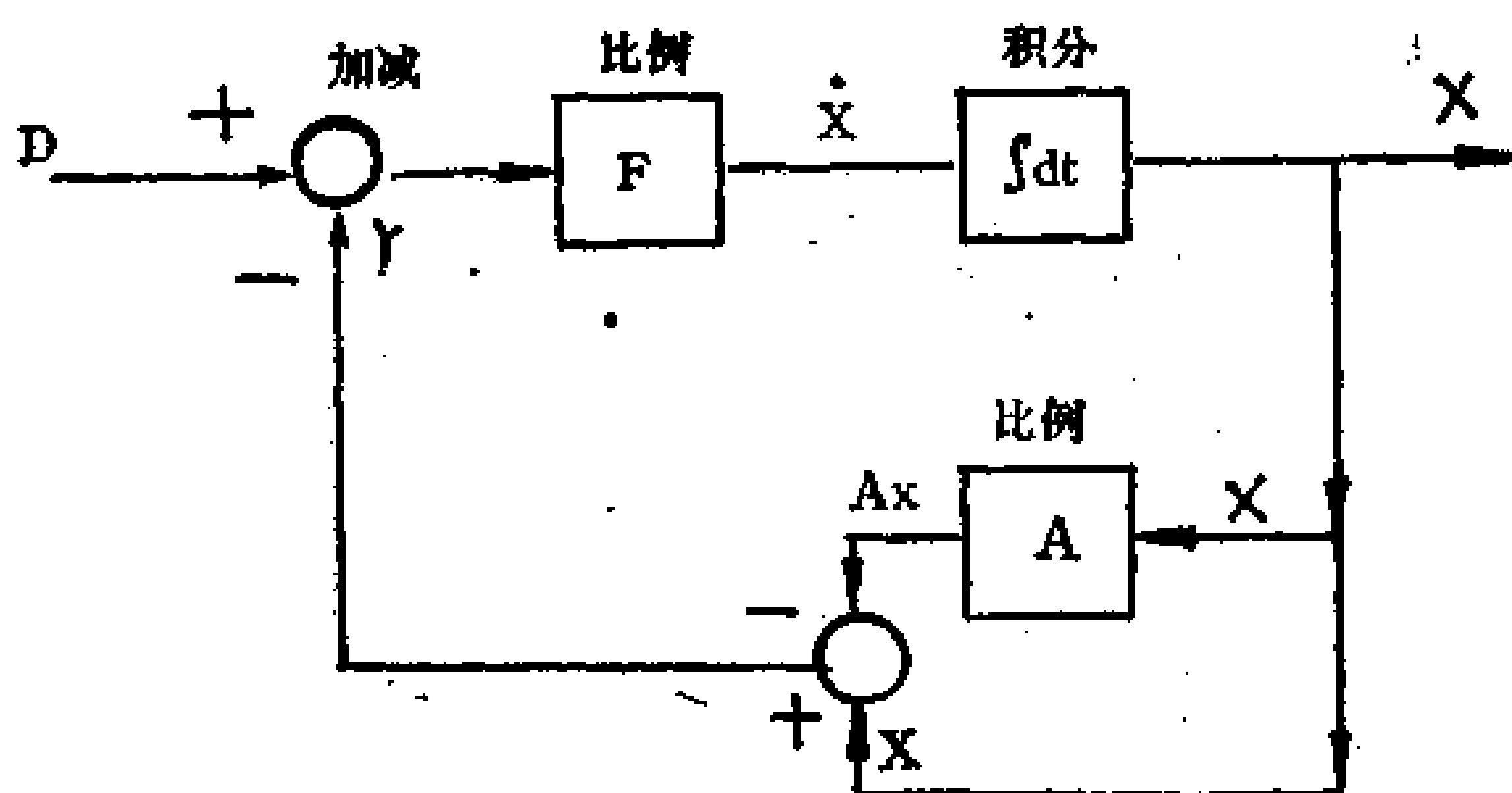


图 7.5

① 参见亨利·塞尔等著:《运筹学与数量经济学基础》,湖南科学技术出版社 1981 年版。

经济计量模型

经济计量模型,是指运用经济理论、数据和统计方法来计量和检验经济变量间相互关系的模型。经济计量模型处理的方法包括各种调整、外推、内插、数据源合并以及其他信息的调整。运用经济计量模型,可以定量地计量经济关系,分析经济结构,预测经济变量的发展趋势,对不同的经济政策加以评价和选择。常用的经济计量模型是一个代数的、线性的随机模型。

这里我们简要介绍经济计量模型的一个实例——农产品的微观模型,它是随机的代数模型,它包括下列三个方程:

$$q^D = \alpha_1 P + \beta_1 I + \delta_1 + \varepsilon^D$$

$$q^S = \alpha_2 P + \beta_2 \gamma + \delta_2 + \varepsilon^S$$

$$q^D = q^S$$

这里, q^D 是某一农产品的需求量; q^S 是这种农产品的供应量; P 为价格; I 为收入; γ 为雨量; ε^D 和 ε^S 分别为需求和供应的随时扰动项。 α_1 、 β_1 、 δ_1 、 α_2 、 β_2 、 δ_2 均为结构方程参数。

所有的经济计量模型包括内生变量或外生变量、随机扰动项和结构方程中的参数。内生变量是指其值由模型方程联立解出的,这里 q^D 、 q^S 、 P 是内生变量。外生变量是指在模型之外决定的变量,会对模型产生影响,它与模型的所有随机扰动项统计无关,而内生变量则和统计相关。上述方程中 I 、 γ 是外生变量。通常外生变量是由历史情况给定的政策变量,或由其他条件决定的变量。

随机扰动项是随机变量,如方程中的 ε^D 、 ε^S ,除了平衡方程之外的其他方程中都包含着随机变量。它的重要性在于,方程中没有考虑会影响供和需的其他变量,而包含的变量可能在计

量上不够准确,同时供和需的行为可能是随机波动的,这些因素都可以在随机扰动项中得到某种补偿。

模型中的显式参数是一些常数。上述方程中的 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \delta_1, \delta_2$, 就是显式参数。模型中也包括某些隐式参数, 即定义 $\varepsilon^D, \varepsilon^S$ 的概率分布的参数。显式参数和隐式参数统称为结构参数, 以上方程组称为结构方程, 是经济计量模型的初始阶段。第一个方程称为需求方程, 第二个方程称为供应方程, 第三个方程称为平衡方程。

通常情况下, 平衡方程可以消去, 设平衡量 $q = q^D = q^S$ 则上述方程组变为

$$q = \alpha_1 P + \beta_1 I + \delta_1 + \varepsilon^D$$

$$q = \alpha_2 P + \beta_2 \gamma + \delta_2 + \varepsilon^S$$

从上述方程组可以解出内生变量

$$P = \frac{\beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} I - \frac{\beta_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \gamma + \frac{\delta_1 - \delta_2}{\alpha_2 - \alpha_1} + \frac{\varepsilon^D - \varepsilon^S}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

$$q = \frac{\alpha_2 \beta_1}{\alpha_2 - \alpha_1} I - \frac{\alpha_1 \beta_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \gamma + \frac{\alpha_2 \delta_1 - \alpha_1 \delta_2}{\alpha_2 - \alpha_1} + \frac{\alpha_2 \varepsilon^D - \alpha_1 \varepsilon^S}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

上述两个方程称为简化形方程。它们表明任何一个内生变量是所有外生变量和随机扰动项的函数, 所有简化形方程的集合称为简化形。它可用于模型的分析 and 估计。估计简化形的系数需用内生变量和外生变量的系数以及计量经济技术。根据简化形系数的估计值, 可以进行经济的结构分析、预测和政策评估。^①

① 参见汪应洛主编:《系统工程》,机械工业出版社1986年版。

(
(
(
(
(
F
Z
F
Z
Z

生物界在亿万年的漫长进化过程中，各种生物为了增殖个体，繁衍物种，保存生命，逐渐形成了最适应环境的完善的系统结构和整体功能。如导航、计算、生物合成和能量转换等系统 and 功能，其小巧性、灵敏性、快速性、高效性、可靠性和抗干扰性方面令人惊叹不已。螳螂能在 0.05 秒的一瞬间，计算出飞掠眼前

的小昆虫的方向、速度和距离而一举捕获之。蝙蝠能在漆黑的岩洞里,准确地定向,穿梭飞行,甚至可以在半秒钟内捕捉到两只昆虫。动物的肌肉能在一瞬间收缩、放松,同时完成一定的功能,从食物的化学能转换为机械能,其效率高达80%。达尔文认为这些都是由于自然选择的结果,生物在进化过程中,在自然选择的作用下,有利的变异被保存下来,有害的变异则被淘汰,使得生物个体自身结构与功能沿着最适宜于生存的方向变异,即把随机的、偶然的变异纳入非随机的、必然的轨道,使生物造成一种逐渐积累的适应趋势,向着优化的方向演化。生物的保护色、拟态、各种复杂器官,都是通过不适应的被淘汰掉,而把适应的保留下来不断优化的结果。例如在器官选择方面,鳄类的外部牙齿在胚胎时期存在,适用于啄破蛋壳所需,出生后就消失了,而蚕蛾具有用以咬破蚕茧的大颚。在形状方面,海鸽卵的形状一端大而另一端小,这对于在悬崖绝壁上产卵是非常有利的,因为它被触动时,主要是打转,而滚动较少,减少了被摔破的机会。^①“自然选择是每日每时在世界上检查最微细的变异,把坏的去掉,把好的保存和推进;不论时间,不论地点,一有机会就在沉默不觉中进行工作,把各种生物与有机的及无机的生活条件的关系加以改进”。^①联邦德国的M·爱根,从物质自组织和生物的高分子的进化,研究生命起源过程中,如何从“无序”的分子“随机地”出现了自组织的状态,并用信息的“选择价值”来说明组织优化的机制。例如人类的染色体组,储存了大约一百亿个核苷酸,而进化过程只从四的一百亿次方个可能组合中选出一个或

^① 达尔文:《物种起源》,科学出版社1972年版,第56页。

几个组合,这个选择过程包含着经济地使用信息的原则,在一个固定环境中包含了所有必要的信息,而所需要的单个数又是最少的那些顺序,一般具有最高的选择价值。进化包含了提高选择价值和利用更大信息量。

而人工自然系统、社会系统的优化,与自然界的优化有着本质的区别。它是人类自觉的、有目的的、能动的认识世界、改造世界的活动。在这一活动中,人们通过各种手段和方法力求以最小的努力而赢得最大的效果。例如生产与库存问题,如果在某一阶段上增大生产的批量,可以降低成本,但因超过该时期市场需求量,就要把一时还不能销售出去的产品贮存起来,因而增加了库存的费用;如按市场不同时期需要来确定不同时期的产量,生产的产品都能及时的销售出去,不存在产品的积压,由于不必贮存产品,因而也不需要贮存费用,但却增加了每件产品生产成本费用。因此,我们在制定生产计划,确定各个时期的产量时就要寻求在几个时期内生产成本和库存费用之和最小。还有资源分配,把数量有限的一种或若干种资源分配给若干使用者,而使目标函数为最优;物体(水流、物料、车辆…等)以及能量、信息量作为流量通过网络时,怎样使流过网络系统的流量为最大;工程计划中,如何最经济合理地安排工程进度从而达到工期短、成本低的目的;售票窗口、医院门诊、机器修理、电话线路、公共车辆、理发店……等,如何根据服务设施与服务对象之间的动态关系来确定最少的服务设施而达到合理的排队长度,以避免设施闲置或排队、等候的时间过长,使得设施闲置的浪费与等候的费用之和为最低等等。

系统优化的核心是整体的优化。在我们遇到的一些大而复

杂的系统、多目标的系统时，一般都是把系统分解为一组相关联的子系统。虽然首先是对各子系统进行局部最优化，但最后仍然是由上级系统通过所能支配的协调变量来影响下级系统，在整体目标的指导下，协调各子系统的目标，使从整体上达到要求的整体目标，即通过求局部最优化得到的局部解，经过协调而得到整体的最优解。

从整体与局部的关系看，系统的优化一般有三种情况：有的是每个局部的子系统效益都好，组合起来的整体系统也最优；有的是局部子系统效益好，但整体系统并不最优；也有从局部看并不最好的，但从全局看却是好的。从长远与目前关系看，也有类似的几种情况：对目前和长远都有利；对目前不利，而对长远有利；对一时有利，长远却不利。整体优化的原则就要求根据已确定的目标，在整体效益最优的原则下，处理好局部与整体、眼前与长远的关系。争取第一种情况，局部与整体、眼前与长远都优，在整体优化的前提下，同时照顾到局部的、眼前的效益。如发展生产、增加积累的同时，要考虑改善人民生活，满足人民群众不断增长的物质和文化的需要。如果在一定时期内，局部与整体、眼前与长远发生矛盾的情况下，局部与眼前就必须服从整体与长远的利益。而那种局部、眼前看来是优，但从整体、长远看是不利的所谓“优化”则是不可取的。例如战争中，害怕打破坛坛罐罐，在敌强我弱的情况下，硬要争一城一地的得失；在工业生产中，为了全面的夺高产，创纪录，不惜拼设备、拼物质、拼人力，这种“杀鸡取蛋”的作法都是错误的。整体效益差，最后必然要影响到局部，到了那时，暂时的优势，局部的效益也终将丧失殆尽。所以在处理整体与部分的关系时，必须从整体出发，把整体

优化作为优化的主要目标。

系统优化最为可贵的地方不仅在于局部和整体都好的情况下发扬优势；而且更在于其组成部分，由于各方面条件的限制不是最优的情况下力求整体优，使部分的劣势通过有机的组合转化为整体的优势。苏联的米格 25 喷气式战斗机，许多零部件从单个看都不是最先进的，比美国落后得多，但由于设计者考虑了整体的性能，因而在爬高、速度等方面成为世界第一流。“三个臭皮匠，顶个诸葛亮”哲理的深刻之处，正是在于三个皮匠的组合产生整体大于部分之和的效应，达到了常人所不能及的智慧。

为了解决系统优化问题，本世纪四十年代以来出现了许多优化的理论，建立了各类系统优化的数学描述和分析的方法，用来解决不同实际问题的优化。下面我们将介绍常用的几种优化方法，并且着重于分析它们各自的特点及优化的思路。

二、线性规划

线性规划是一种最常见的最优化方法。它是研究在一定数量的人力和物力资源条件下，如何恰当地运用这些资源以达到最有效的目的。这种统筹规划问题，用数学语言来表述，就是在—组约束条件下，寻求一个目标函数的极值问题。如果其中约束条件为线性等式或线性不等式，目标函数为线性函数时，就称为线性规划问题。

下面我们以一个线性规划问题作为例子来进行分析。有一个工厂，生产四种产品，每种产品均需依次经过 A 、 B 和 C 三种机床加工，各种机床加工每件产品所需的时间，各种机床每周可用的总时数以及各种产品出售后单件的收益都是已知的，见

下表:

加工 时间 机床 型号	产 品 种 类	产 品				每周可用总时数
		1	2	3	4	
A		1.5	1	2.4	1	2000
B		1	5	1	3.5	8000
C		1.5	3	3.5	1	5000
单件产品收益		5.24	7.30	8.34	4.18	

表 7.2

并且假设生产连续, 产品的收益与销售量成正比。那么如何来确定每周各产品的生产量, 即拟定一个生产计划, 使整个工厂总收益值为最大。初看起来, 似乎只要生产单件收益最大的产品 3, 就可以使总收益值最大, 其然不然, 如果仅生产产品 3, 按各机床可用总时数计算, 机床 B 可生产产品 3 共达 8000 件, 但机床 C 则只能生产 1428 件, 机床 A 则更少, 仅能生产产品 3 约 833 件。这样一来, 只好按 A 的生产能力安排生产, 其结果是总收益只能达到 6947 元, 而且机床 B 和 C 出现了窝工现象, 许多工时未能利用。如果仅生产产品 2, 机床 B 的工时得到充分利用, 可生产产品 2 共 1600 件, 但机床 A 则有 400 个工时, 机床 C 有 200 个工时得不到利用。仅生产产品 1 或 4 也都不是最理想的。为了使得整个工厂的总体的效益最高, 就需要统一协调、规划各种产品的生产。为此, 我们设定各种产品的每周产量 X_j 为变量, j 表示第 j 种产品, 这里 j 为 4, 即 X_1, X_2, X_3, X_4 ; 总收益即目标函数为 Z ;

$$Z = 5.24x_1 + 7.30x_2 + 8.34x_3 + 4.18x_4$$

而确定各 x_j 值时要受到机床可能加工总时数的限制:

$$1.5x_1 + x_2 + 2.4x_3 + x_4 \leq 2000$$

$$x_1 + 5x_2 + x_3 + 3.5x_4 \leq 8000$$

$$1.5x_1 + 3x_2 + 3.5x_3 + x_4 \leq 5000$$

而且 $x_j \geq 0$, 即非负性。满足上述约束条件的解就是可行解, 但可行解还不是最优解, 只有既满足约束条件而目标函数值又最大, 才是最优解。通过求解数学模型, 当产品按 $x_1 = 239.6, x_2 = 1500, x_3 = 0, x_4 = 58.84$ 的数值安排生产时, 工厂总体效益最高, 而单件收益最高的产品 3 却不宜生产。

线性规划数学模型的一般形式:

$$\text{目标函数 } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n = \sum_{j=1}^n c_jx_j$$

$$\text{约束条件 } \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i (i=1, 2, \cdots, m)$$

$$x_j \geq 0 (j=1, 2, \cdots, n)$$

求解线性规划的数学模型, 可用图解法, 也可用单纯形式。用单纯形式寻求最优解的基本思路是首先在约束不等式中加入松弛变量或剩余变量, 使不等式约束转化为等式约束。根据目标函数和等式约束列出初始单纯形表, 通过表求得线性规划问题的可行解, 引入判别数 λ_j 来检验可行解是不是最优解。若在求目标函数的极大值中 $\lambda_j \leq 0$, 由单纯形表求得的可行解即为最优解; 若判别数 $\lambda_j > 0$, 由单纯形表求出的可行解就不是最优解。这时, 必须利用判别数和替换比来确定基准列和基准行, 然后通过迭代运算和继续列单纯形表求解, 直到表中判别数的值全部小于或等于零时, 所求得的解为最优解, 这时目标函数之

值即为最优值。

三、非线性规划

在实际工作中除线性规划问题外，我们还会遇到一些非线性规划问题。所谓非线性规划问题，就是在目标函数或约束条件中出现了非线性函数，这样一类的规划问题就称为非线性规划问题。

例如：

$$\max Z = 10x_1 - 0.01x_1^2 + 6x_2$$

$$S.t \quad x_1 + 0.429x_2 \leq 150$$

$$x_1 + 0.750x_2 \leq 175$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \text{ (max 表示最大化; } S.t \text{ 表示约束条件)}$$

其中主约束条件虽然是线性的，但目标函数 Z 不是自变量的一次函数，出现了非线性函数，这种规划问题就是非线性规划。

又如：

$$\max Z = 38x_1 + 450x_2$$

$$S.t \quad 0.5x_1 + 2x_2 + 0.25x_2^2 \leq 800$$

$$x_1, x_2 \geq 0$$

这里目标函数仍是线性的，而约束条件不再是线性函数，这类规划问题也为非线性规划问题。

非线性规划问题的求解，要比线性规划问题困难得多。因此，在实际工作中，只要条件允许，常常用一些线性规划来替代非线性规划进行求解。只有当必须用非线性函数才能确切表达规划问题，以及精确度要求较高不能用线性规划近似替代的情况下，用非线性规划直接求解。

寻求非线性规划问题最优解的方法虽然很多,但还没有一种十分成熟、对所有非线性规划最优化问题的求解都行之有效的方法,而只能根据不同类型的问题而采用相应的较为有效的方法。对于单变量函数的非线性规划最优化问题的求解方法,即单峰函数的寻优方法有斐波那契法、黄金分割法、牛顿法、抛物线逼近法等。对于多变量无约束的非线性函数的最优解,求解方法则又可分为两类:一类是梯度法(即最速下降法)、二阶导数法,因这两种方法用到了函数的解析性质,所以它们统称为解析方法;另外还有一类不同函数的解析性质的方法,称为直接法,如坐标轮换法、步长加速法等。而多变量有约束条件下的非线性规划问题就更加复杂,极值求解也就更加困难,基本的思路是:或把非线性问题转化为一系列线性问题来求解,如用线性逼近法来近似求解非线性规划问题;或将有约束的问题转化为无约束的问题,将不等式约束转化为等式约束问题求解,如采用消元法、罚函数法(外点法)等。

四、动态优化

在人们的实践活动中,经常处理的系统是一个随时间变化的动态过程,因而系统的优化又表现为过程的优化。例如从A地要铺设一条管道到E地,必须经过三个中间站,第一站可以在 $\{B_1, B_2\}$ 两点中任选,第二,三站可以分别在 $\{C_1, C_2\}$, $\{D_1, D_2\}$ 中各选一点,现在要求选择一条由A到终点E的最短的铺管线路,管道相连的两站之间的距离,在图上用连线边的数字表示。我们可以用穷举法,先画出8条可能选择的路线,然后把两点距离加起来进行比较,就可找出由始点A到达终点E的最短线路:

$A \rightarrow B_2 \rightarrow C_1 \rightarrow D_2 \rightarrow E$ 。进一步分析最短线路的性质，可以看到如果最短路线在某一站通过某一点，则由这点出发到达终点的这条路线，对于从这点出发到达终点的所有可能选择的不同路线来说，必定也是最短路线。即找到了 $A \rightarrow B_2 \rightarrow C_1 \rightarrow D_2 \rightarrow E$ 是由 A 到 E 的最短路线，则 $C_1 \rightarrow D_2 \rightarrow E$ 应该是由 C_1 出发到 E 点所有可能选择的不同路线中的最短路线。（见图 7·6）

最短路线这一特性，它给了我们一个启示，寻找最短路线的方法，可以从最后一段开始，由后向前递推，从终点逐段向始点方向寻找最短路线：

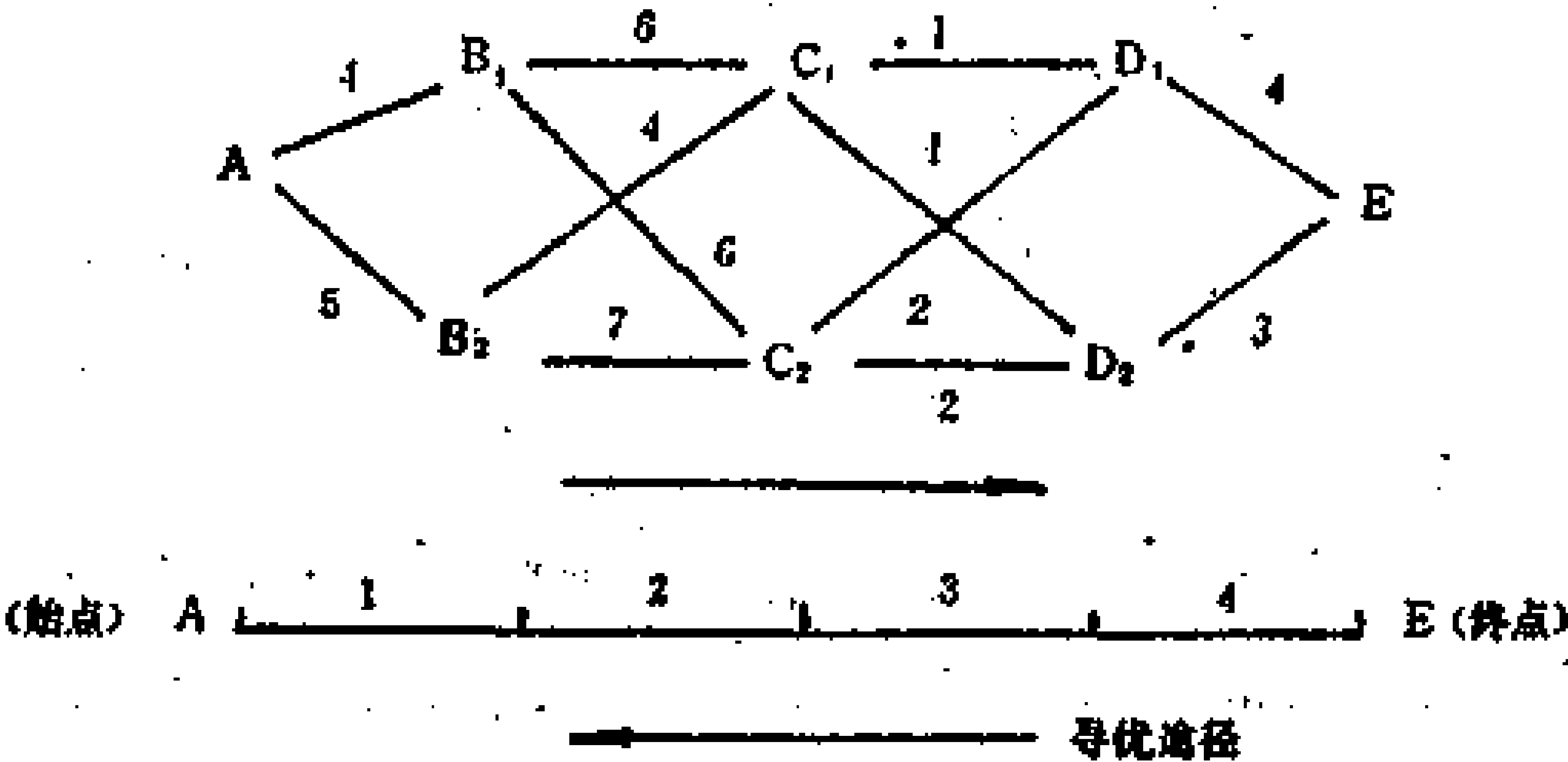


图 7·6

据此，美国的贝尔曼于 1951 年提出了动态规划的最优化原理：“作为整个过程的最优策略具有这样的性质，即无论过去的状态和决策如何，对前面的决策所形成的状态而言，余下的诸决策必须构成最优策略。”这个原理，把最优化方法归结为用一个基本的逆向递推关系式，从终点开始逐段向起点方向寻找最优途径。

按最优化原理寻找由 A 地到 E 地的最短铺管路线，其计算

过程可借助于图形的标号法简明的表示出来(见图 7·7)。

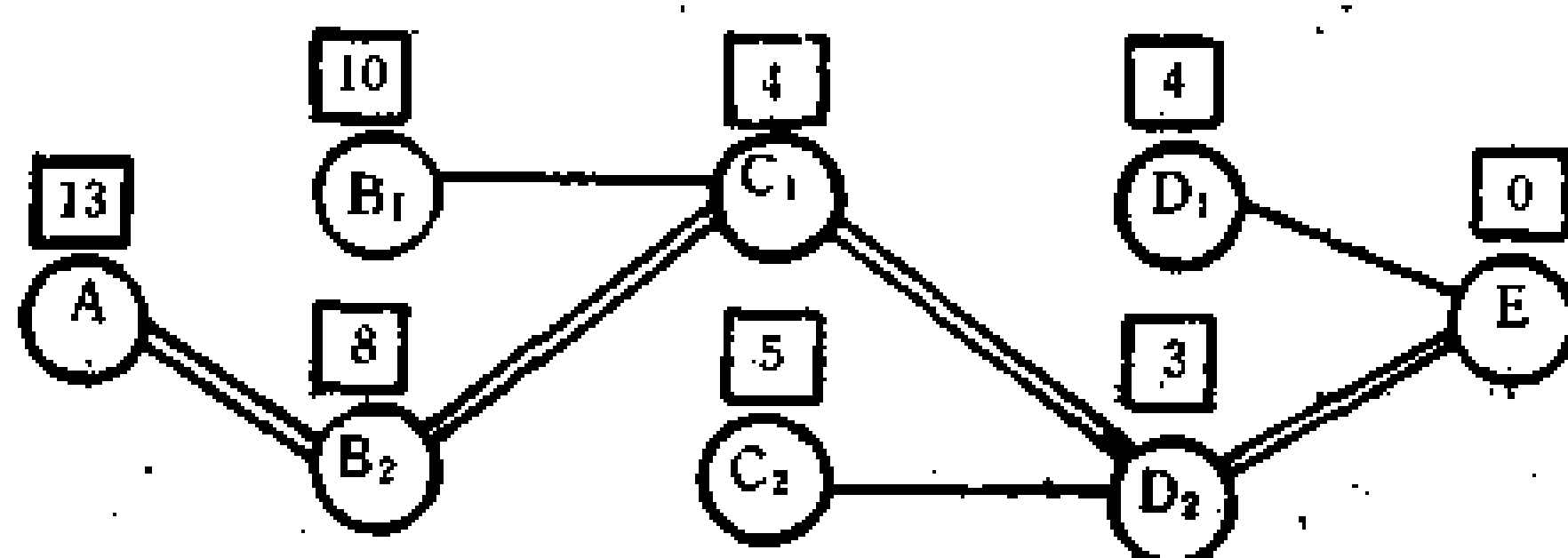


图 7·7

图中每节点处上方的方格内的数，表示该点到终点E的最短距离，粗线表示由A到终点E的最短线路。由于寻优途径是逆向的，所以首先标出离终点最近一段(第四段)， D_1 、 D_2 分别到E点都只有一条路线，所以可以将距离数字分别直接写在该点的方格内。然后再标第三段，第三段 C_1 、 C_2 点到终点分别都有两条路线。如 C_1 到E点就有 C_1-D_2-E ， C_1-D_1-E 。而 C_1 到E的最短距离应为 C_1 到 D_2 和E的距离即 4，将此数字标在 C_1 点的方格内，并用线把 C_1 、 D_2 、E 连起来，而将 C_1-D_1-E 支路舍去，被舍去的支路，在下一段计算时将不起作用。同样 C_2 到E的两条路线以 C_2-D_2-E 最短(为 5)，并将数字标在 C_2 点的方格内。这样继续按逆推过程一直计算到起点，A 点标的数字即为A点到E点的最短路线之长，并用双线表示最短路线。

动态规划的方法由于它始终以整体的最终目标优化为依据，控制、协调系统各阶段、过程子系统的行为，因而不仅得到了由A点到E点的最短路线及相应的最短距离，而且得到了从所有各中间点出发到终点的最短路线及相应的距离。不仅取得了整体的最优解，而且还得到了局部的最优解。其计算的方法也更加简便，如上例用穷举法需要相加 $(n-1) \cdot 2^{n-1}$ 次， n 为 4 段，

则需相加 24 次。而根据优化原理用动态规划方法进行计算只要相加 $4(n-2)+2$, 即 10 次就可以。因此被广泛运用于多阶段决策过程的最优化问题, 如最短线路, 机器负荷分配, 生产计划, 生产与存储, 资源分配, 水库调度等, 甚至被用来解决某些静态优化问题^①。

五、随机服务系统优化

人们在日常生活中, 还存在着病人到医院排队挂号、看病, 旅客排队购车、船票, 顾客购买商品, 机器等待修理等一类现象。我们把要求服务的对象, 如病人、旅客、顾客、等待修理的机器等系统称为“顾客”, 而把提供各种服务的各种机构称为服务机构。由于顾客到来的时刻与进行服务的时间, 都是随不同的条件和时机而变化的, 因而由顾客和服务机构组成的系统是一种随机服务系统。这里我们要分析的就是这类随机系统的优化问题。

随机服务系统包括输入过程、排队规则和服务机构三个部分 (见图 7.8)。其中, 输入过程是指可能到达服务机构的顾客

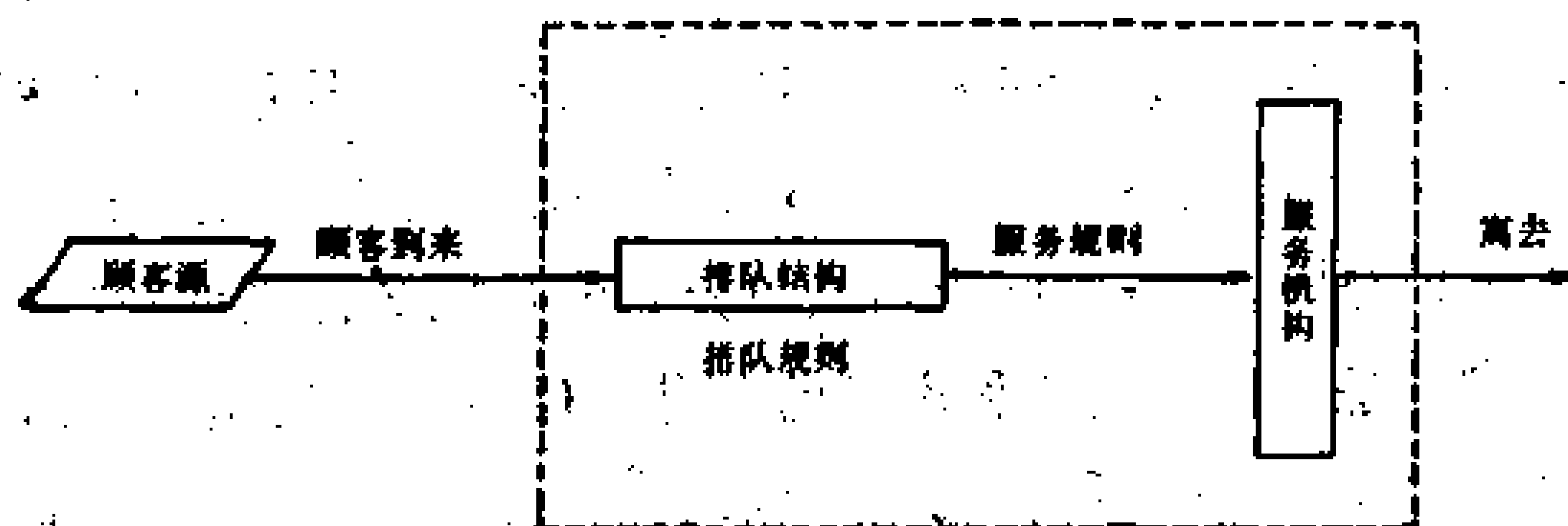


图 7.8 随机服务系统

① 参见《运筹学》，清华大学出版社1982年版；汪应洛：《系统工程导论》，机械工业出版社1982年版。

总数(有限的或无限的),顾客到来的方式(单个的或者成批的),顾客相继到来的时间间隔。排队规则是研究和解决顾客接受服务的先后次序问题,如果顾客到达时所有服务台均被占用,在这种情况下顾客可以立即离去,也可以排队等候。随即离去因要失去顾客,故称损失制,而排队等候的则称等待制。等待制为顾客服务的次序,可以采用先到先服务,后到先服务,随机服务和优先服务等规则。此外还有损失制与等待制相混合的混合制,当排队队列的长度小于某一数时顾客等待,但当队列长度大于或等于某一数值时,顾客就不愿等待服务而自动离去。服务机构又称服务台,服务台的数目可以是单个也可以多个,服务员的排队系统有单队——单服务员,单队——多服务员,多队——多服务员,以及单服务员的串连排队系统。服务的方式,接受服务的顾客数可以是单个的或成批的,服务时间分布有确定的(即定长分布)和随机的(如负指数分布)。

为了对随机服务系统排队模型进行分类和符号表示,1953年康道尔(D. G. Kendall)提出了 $[A/B/C]$ 符号描述方法,其中 A 表示顾客相继到达的间隔时间分布, B 表示服务时间分布, C 表示服务台的数目。如果用符号 M 表示到达过程为泊松过程,或服务时间服从负指数分布,那么 $M/M/1$ 就表示为顾客到达服从泊松分布,服务时间为负指数分布的单服务台模型。(泊松排队模型是一种在到达和离开的各种条件下的排队模型)1966年艾·姆·里(A. M. Lee)在康道尔的代表法基础上又增加了三个因素,从而形成了对排队系统较完整的表达方式,其一般形式为 $[A/B/C];[d/e/f]$, d 表示排队系统的最大容量, e 为顾客的总体数量, f 为排队规则。如果一个随机服务排队系统的表

达式是 $[M/M/1];[\infty/\infty/G]$, G 表示一般服务规则,那么,这个系统就具有下列特点:顾客到达服从泊松分布,服务时间为负指数分布,单服务台,排队系统内的顾客数没有限制,顾客源无限,不限制服务规则。

随机服务系统优化,就是系统设计与控制的最优化,目的是使在一定质量指标下要求机构最为经济,并且在给定的系统中,如何运营使某个目标函数最优。系统服务质量的优劣可以用系统中的顾客数(等待服务的顾客数加上正在接受服务的顾客数)、顾客从到达接受服务的时间(即逗留时间)和平均完成服务顾客数的服务机构的效率等三个数量指标进行衡量。在一般情况下,提高服务水平就会缩短逗留时间,降低顾客等待费用(损失),但相应地要增加服务人员和服务设施,从而增加了服务机构的成本。反之,如果服务人员及服务设施不足,顾客等待时间过长,又会使顾客因等待服务所造成的损失增加,机器待修而使生产受影响,病人由于拖延治疗使病情恶化,以及因队列过长而失掉顾客造成的营业损失等。因此,优化目标之一就是使成本与损失两者费用之和为最小,从而确定达到这个目标的最优服务水平。

关于寻求随机服务系统各种模型的最优解的方法有多种。对于离散变量,常用边际分析法;对于连续变量,则用经典的微分方法即可;至于较复杂的问题,一般采用非线性规划或动态规划的方法。这里我们只介绍最简单的也是最常见的,变量是线性关系及连续的 $[M/M/1];[\infty/\infty/G]$ 系统的优化。设: μ 为系统的平均服务速率,即单位时间可以服务完的顾客数,用它来表示服务水平; λ 表示顾客到达的平均速率,即单位时间内

到达的顾客数； C_1 为单位 μ 值之费用，可以理解为服务机构在不同的速率上服务，而对于单位速率需付出价值为 C_1 的费用； C_2 是表示每个顾客在排队系统中停留单位时间所消耗的费用； L 为系统中平均顾客数或顾客数的期望值， $L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$ 。（见图 7.9）这类随机服务系统中，虽然顾客到达的分布和速率无法改变，但可以通过改变服务速率，提高服务水平，从而设计出费用最少的系统。在上述模型中，服务速率在 λ 与 $+\infty$ 之间连续可变，总费用

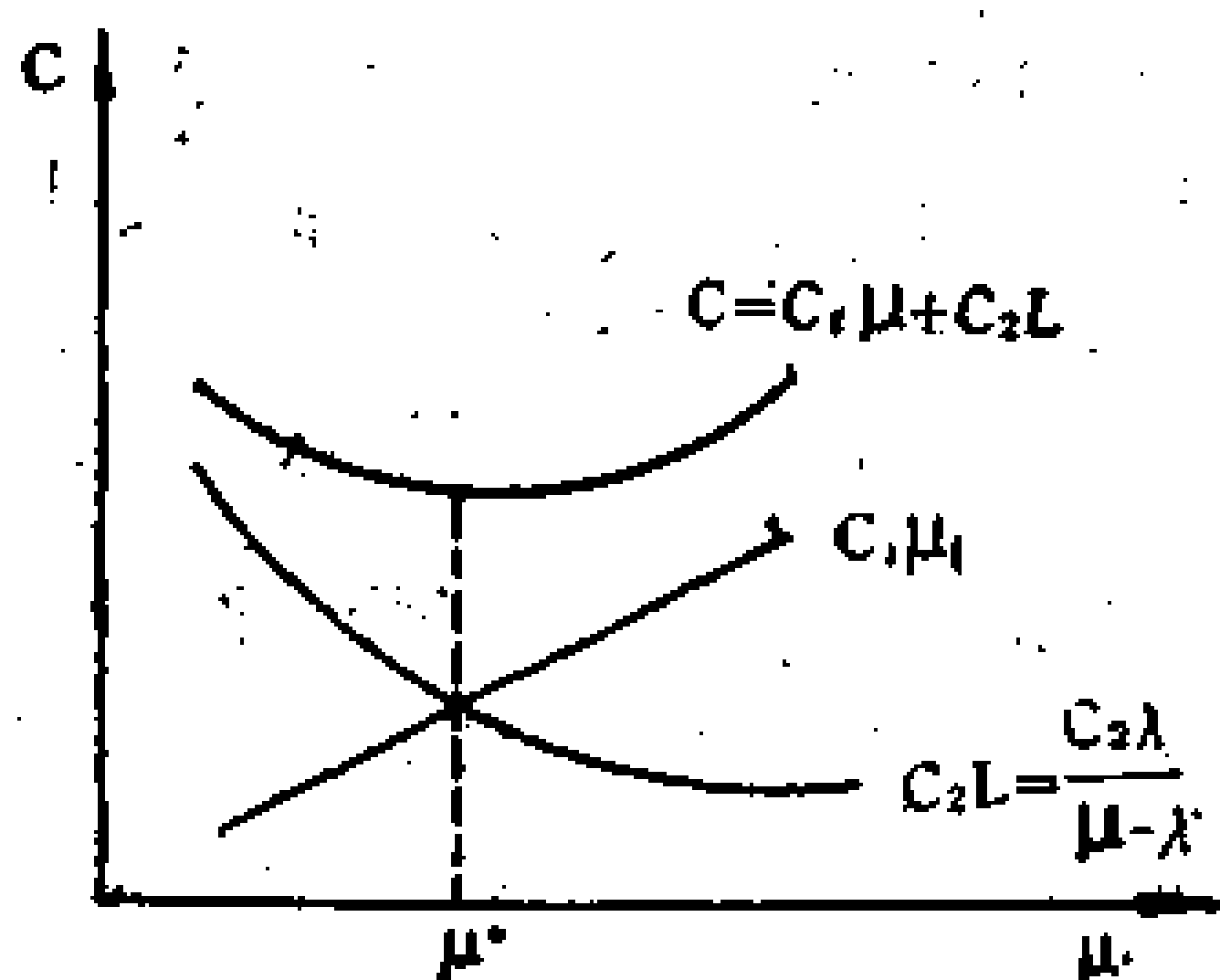


图 7.9 连续 μ 值的费用关系曲线

$$C = C_1\mu + C_2L$$

将 $L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$ 代入上式

$$C = C_1\mu + C_2 \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

用微分方法求出总费用 C 为最小的 μ 的极值

$$\mu^* = \lambda + \sqrt{\frac{C_2\lambda}{C_1}}$$

μ^* 点就是极小点。^①

第五节 系统的评价

一、评价的涵义与评价的准则

所谓评价,是指依据明确的目标,确定系统的属性,并把这种属性转换为主观价值的过程。对系统进行评价时,要用评价的标准规定评价对象,对其功能、特性、效果等属性进行科学的观测,就系统方案所能满足人们主观需要的程度和所消耗占用的资源情况进行权衡,选择其中技术上先进、经济上合理、建设上可行的系统最优方案。系统评价是对系统分析过程和结果的鉴定,其主要目的是判别设计的系统是否达到了预定的各项技术经济指标,能否投入使用提供决策所需要的信息。

领导对于某系统进行决策时,应当全面地考虑系统状态的信息,并对依据这些信息所采取的策略以及执行这些策略可能产生的后果进行综合评价,按照评定的价值来判断各种策略和方案的优劣,作出正确的决策。

由此可见,系统的评价对于决策的有效性关系极大,正确的评价可以使决策获得成功,取得很大的效益;错误的评价可以导致决策失败,付出沉重的代价。

系统的评价可以分阶段进行。特别是对于复杂大系统的开发,各个重要的环节都需要作评价工作。确定系统的目标之后,

^① 参见刘令德、夏国平:《系统工程基础》,中央广播电视大学出版社。

要进行目标评价；制定决策方案之后，要进行方案评价；作出系统设计之后，要进行设计评价等。一般说来，系统的评价可分为：着手系统开发时进行的事前评价，在开发过程中进行的中间评价；在开发完成之后进行的终结评价。这种事后的终结评价，不仅是为了确认系统开发的成果，而且也是为了总结经验，改进今后的开发工作并使之定型化。总之，开发的系统规模越大，越复杂，就越要把评价的重点集中在如何减小系统的风险性这一点上来。

系统评价时，首先要根据系统目标规定一组评价指标，即确定评价的项目，制定评价的准则。不同的系统，可以有不同评价指标。系统评价的项目是由构成系统的性能要素来确定的，主要包括系统的功能、进度、成本、可靠性、实用性、适应性、寿命、技术水平、生存能力、竞争能力、重量、体积、外观、能耗等因素。它们构成描述系统性能的有序集合，可以根据系统所处的实际环境条件，来安排它们的评价顺序。对于这些因素赋予一定的加权量（反映各因素在系统评价中的价值地位的系数），经合成以后形成一种评价的价值体系。这种价值体系主要是从技术和经济的角度来进行衡量。但是，在包含人的因素和社会因素的系统中，这种价值系统的结构要更复杂一些。同时，对于各种不同价值观的人来说，评价准则的内容和选取的加权量也是很不相同的。另外，在系统的使用者之间或系统的开发者和使用者之间也往往会发生争执。因而在系统评价阶段，就要对这些问题展开充分的讨论，使各个问题同构成要素之间的相互关系搞明确，取得充分一致的意见，在此基础上对系统进行量化的评价。

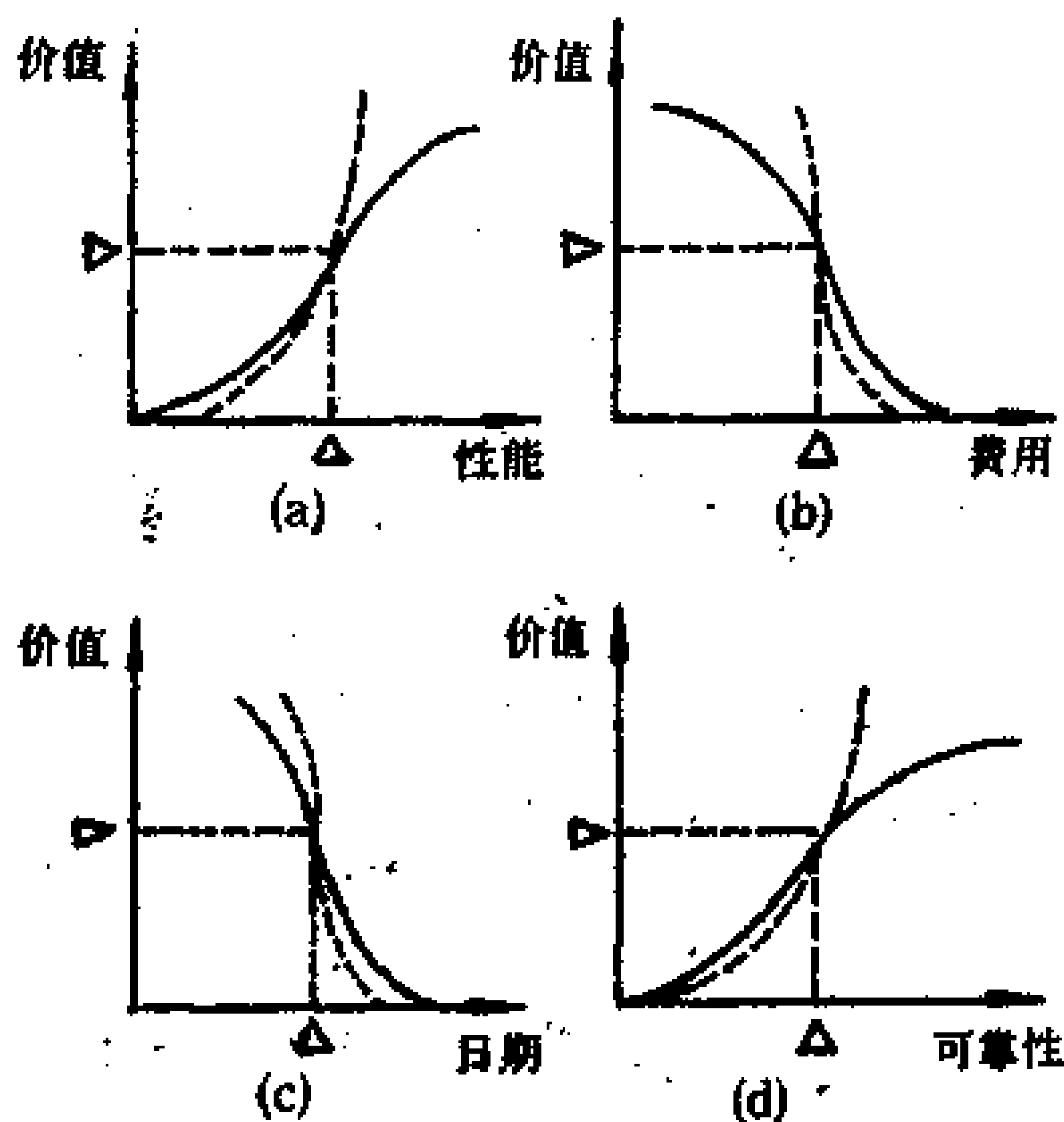


图7.10 系统价值曲线图

在企业管理系统中，通常用系统的价值来衡量系统达到目标的程度，这种价值主要包括系统的功能、建立系统所需的费用、完成系统的期限、系统运行的可靠性等评价因素。这些评价因素和系统价值的关系，可用价值曲线图来描述，它们呈S形和反S型(图7.10)。这些价值曲线图表明，系统的功能和可靠性的提高，可以使系统的价值有所提高；系统的完成期限的延长和费用的提高，却使系统的价值降低。因此从系统的总体出发，综合分析系统价值各方面的得失利弊，尽量把不同尺度的评价准则统一起来，综合评价，求得比较合理的评价值(图7.10中箭头所示的位置)，以达到用最少的费用获得最大的价值的系统方案。系统的其他评价要素，如系统的寿命、资源消耗、社会效果、对国家

技术水平的影响、对管理水平的提高等,要视各方面的不同要求选用,综合进行评价。一般说来,为了评价系统方案的优劣,应当确定一个指标体系来进行评价。指标体系的选择,要视被评价系统的不同特点,如评价系统的经济效果,可用总产值、利润率、质量品种与改善、单位产品成本、投资回收期、固定资产产出率、产品销售率、环境改善、劳动生产率、资金周转率等评价因素组成的指标体系。技术系统的评价,可用技术的先进性、技术的经济效益、技术的适用性、技术的扩散性、技术对环境的影响等指标。社会系统的评价,可用更大范围的评价指标,如技术、经济、政治、思想文化、社会心理、国际影响等方面的指标。

二、评价的方法

系统的评价是一系列科学的定量的论证工作,从战略到战术,从客观到主观,从经济效果到社会效果等各个方面进行周密细致的论证和评价,都要借助于科学的方法。所谓评价方法,就是对系统的价值观念加以分析使之定量化的手段。常用的系统评价方法有下列几类:

1. 直观判断法,以人们的知识、经验为基础,借助于“分数”或“指数”的评价尺度,对系统方案进行评价和估量。这种方法包括各种评分法、图示法、专家评估法等。

2. 经济评价法,当系统的所有评价特征可以用价值形式和货币单位来衡量时,就可以采用成本/效益分析、价值分析、投资分析的方法进行评价。

3. 价值树法,这是利用决策树方法进行价值分析,根据期望值的大小来评价不同系统方案的优劣。

下面对几种常用的具体评价方法略加介绍。

1. 相关矩阵法

这种方法主要用于系统决策时，在若干可以相互代替的独立的备选方案中选取其一个或几个方案的评价方法。表 7·3 中

对 象	因 素 加 权 量	A	B	C	D	评 价 值
		W_1	W_2	W_3	W_4	
a		a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	$\sum_{j=1}^4 W_j a_{1j}$
b		a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	$\sum_{j=1}^4 W_j a_{2j}$
c		a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	$\sum_{j=1}^4 W_j a_{3j}$
d		a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	$\sum_{j=1}^4 W_j a_{4j}$

表 7·3 相关矩阵表

的 a、b、c、d 等是为系统决策而拟制的四个代替方案；A、B、C、D 是根据系统的特性确定的一组评价指标（例如可靠性、价格、操作性能、扩张性等）； W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 是评价时各评价指标的相对重要程度，即按各评价指标的价值确定的加权量。如果各评价方案对应的各评价指标的评价值（如对量和质给定分数以及加权量）为 a_{ij} 的话，则每一个评价方案的总评价值为 $\sum_j a_{ij} W_j$ 。我们就可以根据总评价值的大小把各个备选方案排列起来，以表示它们的优劣。

例如，根据丘·切斯纳特法，把相关矩阵的计算过程表示如

下(图 7·11),其中评价的指标有①功能;②费用;③时限;④可靠性等。这些指标加上加权量形成综合评价值,反映系统的综合功能。除了这些评价指标外,还有以下评价指标,系统维修和保养的难易程度;兼容性;通用性等,共同构成评价指标体系,对系统进行综合评价。

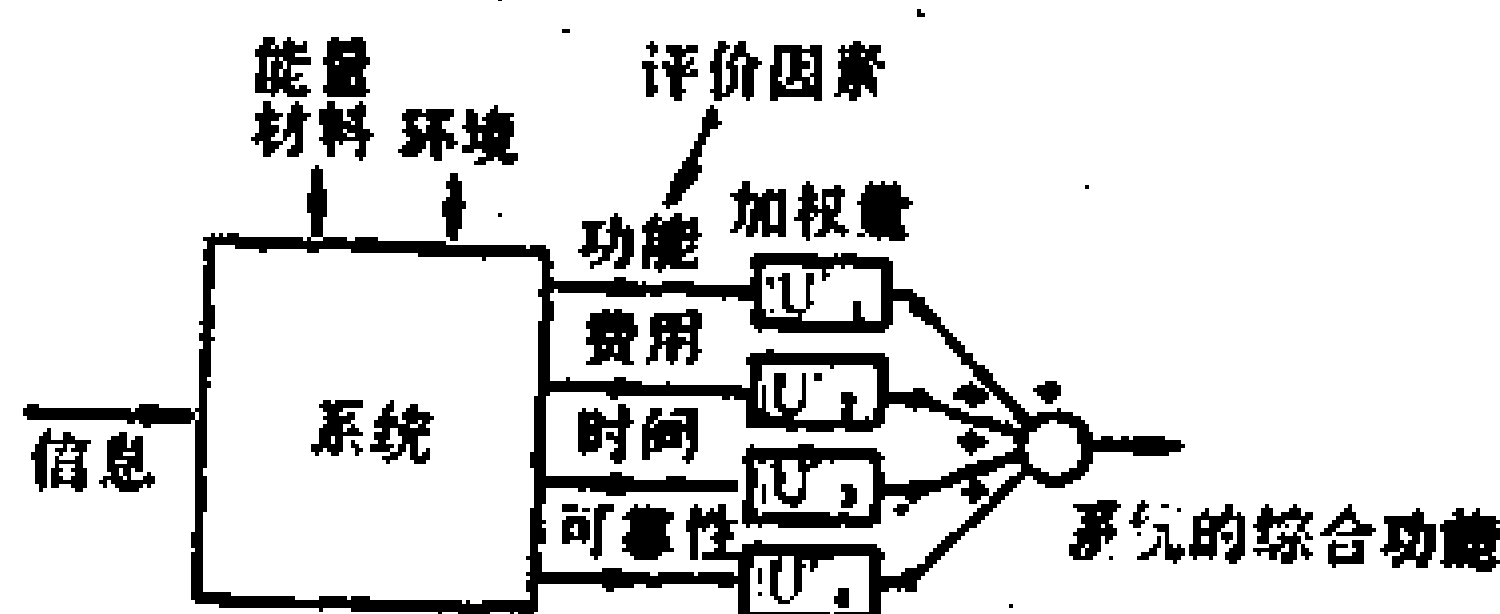


图 7·11 系统的综合评价

2. 费用效果分析法

这是依据系统所取得的效果和所消耗的费用,对系统进行分析评价的一种方法。所谓效果通常是指实现系统的决策方案而获取的有用产品和劳务的价值;费用是指实现系统的决策方案所投入的产品和劳务的价值。费用效果分析的目的是对系统决策的几个备选方案进行比较和评价,说明它们是否适合于系统的决策目标,使用多少经费,完成的时限多长,有无风险等。一般来说,在分析评价中确定系统的目标与环境之间的定量关系是很重要的。

费用分析是费用效果分析的支柱。在系统的设计阶段,它按照技术特性和系统寿命,对于在研究开发、投资和实用等阶段所需费用的关联性进行分析。其中时机是很重要的,使用晚了往往会影响系统的使用效果,长时期的变更方案会浪费研制费用。

系统的研制费用、投资费用和使用费用的时间序列如图 7·12 所示：系统的研究开发阶段的费用不高，持续时间不长；投资阶段费用很高，但持续时间很短；系统实用阶段费用不高但持续时间很长。因此，如果系统的研究开发一旦决定以后，应及时投资转入使用，才能减少费用，取得较好的效果。

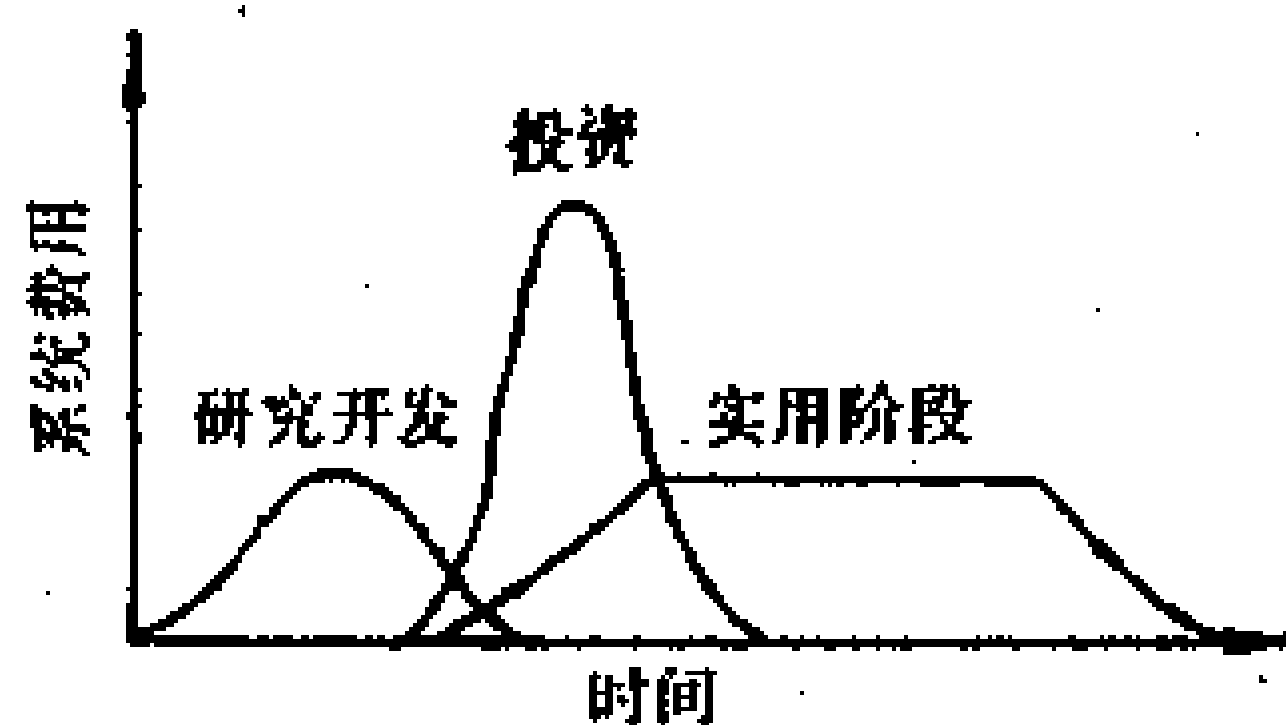


图 7·12 系统费用时间序列图

当然，也可以按不同会计年度分析这些费用，但应当注意的是，即使系统寿命期内所需的总费用相同，系统费用的时间序列也可能不同。为了把这种时间序列不同的系统作为代替方案进行比较，需要把系统的未来费用或价值换算成现时的价值。其换算的公式如下：

$$P = S(1+i)^{-n} = S(SPPW) \quad (1)$$

$$P = R \frac{[1 - (1+i)^{-n}]}{i} = R(USPW) \quad (2)$$

式中的 P 表示现时的价值， S 表示未来的价值， i 表示利息率， n 表示年数， R 表示未来的支付额。“SPPW”表示为暂时支付的现时价值，也叫做年金额；公式(1)是把将来的价值换算成现时的价值。“USPW”表示为统一支付的现时价值，也叫做年金现时价值；公式(2)是把将来的支付额变换成现时的价值。

另外,在系统内部结构改变时,就要分析系统的费用如何变化?影响费用变化的因素是什么?系统的运行环境会给费用带来多大的影响?等等。并且要把分析的结果表示成便于利用的形式。这种分析称为费用灵敏度分析。

在效果分析和费用分析中,为了最终选定系统的决策方案,需要把效果和费用两个因素结合起来,对各代替方案给出优劣的顺序,以便进行决策。系统的效果,有的可以换算成货币的价值形式,有的效益则不能用货币的价值形式来表示,如风景优美等。对后者进行费用效果分析要比前者困难得多。对于这样的系统方案进行费用效果分析,可以采用:效果一定,比较费用的高低;或费用一定,比较效果的大小。

三、技术再评价

现代科学技术的进步虽然促进了社会的发展,但也对社会带来很多副作用,促使人们对技术的开发进行评价。这种评价不仅限于经济方面,而且也包括对于人类自身、社会、环境的影响方面。技术再评价是以技术系统的开发为对象,这种评价重视对于长远的、综合的倾向,重视技术和社会的关系、人们的价值观以及技术带来的副作用。

技术再评价的程序,虽然不同的技术系统有不同的要求,但总的评价程序有一定的规律可循。具体步骤如下:首先,明确技术对象的范围和目的,是要估计现在和将来的技术适用状况,从而确定利用技术的范围;接着,对技术进行详细探讨,从环境和社会的观点出发,从硬件和软件两个方面来研究技术的地位;然后,分析技术的影响,要列举影响的各种情况,分析正反两

方面的效果,探讨影响的过程和机制;在此基础上,进一步分析影响的相互关系和实际状态,根据影响的程度分类,掌握系统的影响体系,明确因果关系,并对各种可能的对策和影响进行个别评价,最后,进行综合评价,提出评价对象的技术和对策的综合评价和综合结果,如不能满意时,再返回各阶段再评价。

与这种评价方法相类似的,还有环境评价法。环境评价要在设备安装或地区开发之前进行。这是预先测定开发系统对社会和环境可能带来的影响而进行评价的方法。例如1973年美国科学院曾就 SST 超音速客机的停止开发提出建议,因为这种飞机在飞行时排出的气体会破坏臭氧层,使地面紫外线照射增强,引起皮肤癌患者增加,因而对人类及生态系统产生重大的

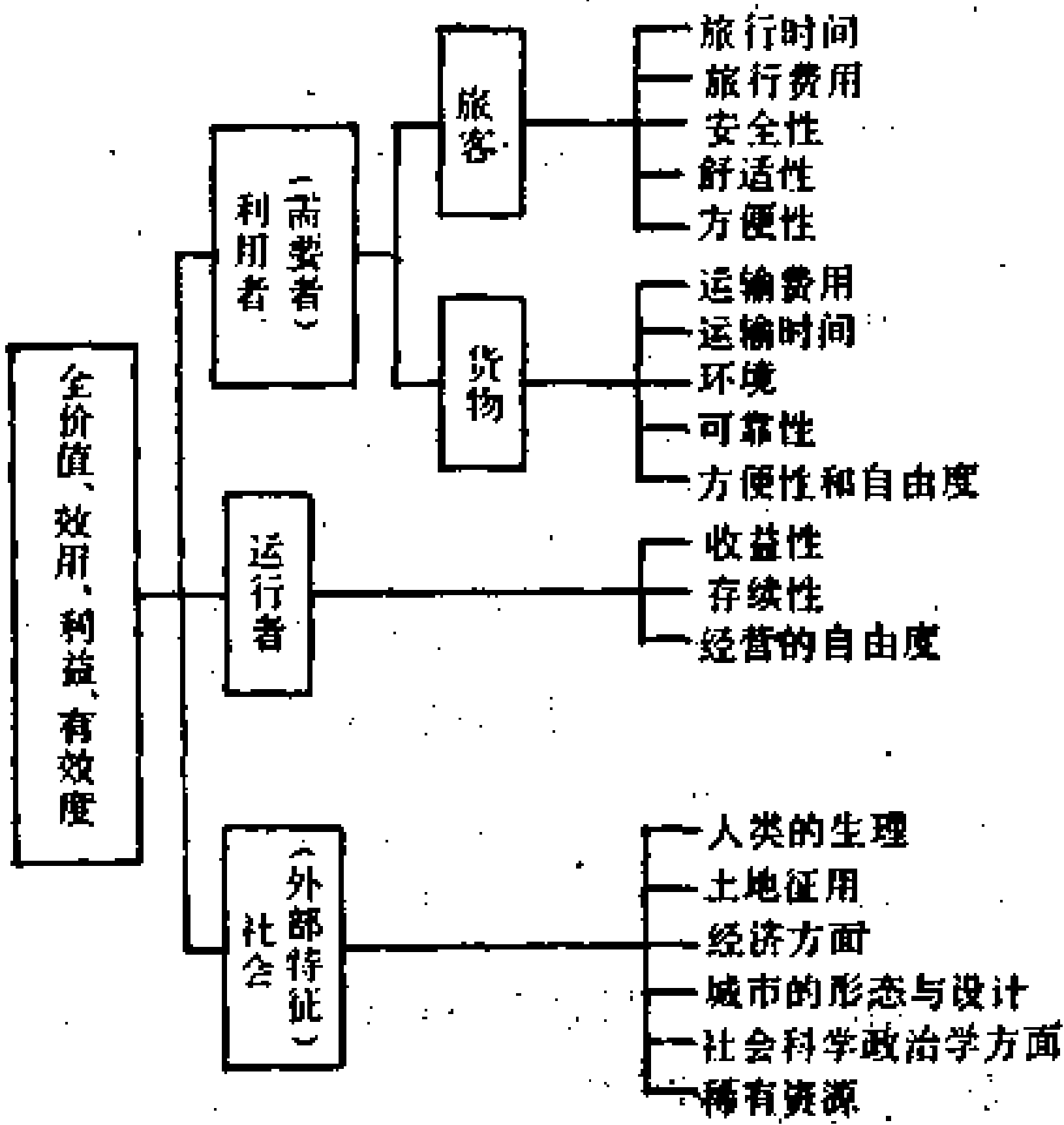


图 7·13 交通系统的评价项目

影响。环境评价的结果可以成为政府制定环保政策的基本依据。

环境评价应根据不同学科要求列出评价项目，给出每个项目的加权量。评价的项目可以层层分解，并定出评价总分，利用评价函数就可对测定值求得评价分数。如果对评价项目和评价函数的形式作一些修正，就可以把这种评价方法推广于其他领域。美国兰德公司就是用环境评价的方法来评价交通系统（见图7.13）。

第六节 系统的可靠性和可行性

一、可靠性的意义

我们知道，任何一个系统和系统中的任何一个组成部件、元件，都有一定的寿命，它们不可能永远不损坏、不失效。由于系统是按照一定的秩序有机结合在一起完成特定功能的统一整体，其中每一个元件的功能，都会对系统整体的功能产生一定的影响，甚至有的元件失效会破坏整体的功能。1986年元月美国“挑战者”号航天飞机，在助推火箭起飞几秒后，由于个别部件失灵，造成整机爆炸，七名宇航人员全部遇难的惨重损失，究其原因就在于火箭系统的可靠性评价出了问题，造成决策和控制的失误。可见系统的可靠性是何等的重要。对于一个正常工作的系统，尤其是现代的自动控制系统，都要求有一定的可靠性，对于那些规模庞大、结构复杂、价值昂贵的大系统，如自动武器系统、通讯系统、电子计算机网络系统、航天系统，必须具备更高的

可靠性,决不能允许有半点差错。

随着现代科学技术的迅猛发展和世界新技术革命的兴起,世界的经济竞争日趋激烈。一个企业要想在竞争中求得生存和发展,关键是要获得信用,这是关系到企业发展前途的问题。所谓信用,就是企业以优质价廉的产品和服务,获得广大消费者的信任,而可靠性的评价和技术,是企业获得信用的最重要的因素。

可靠性的含义,有广义和狭义两种解释。从广义上说,可靠性是指消费者对于产品的满意程度,或者是对企业信赖的程度。但是,这种对可靠性的理解,是凭人的主观感觉来判别的,没有一个严格的客观标准。从狭义的观点来看,要对可靠性作出客观的解释,有一个严格标准,因而可以这样定义:所谓可靠性,就是在给定的条件下和规定的时间内,系统的元件、部件、设备或系统完成特定功能的概率。

对于可靠性的这个定义需要说明两点:第一,这个定义和日常生活中的可靠、不可靠的模糊性的描述不同,而是用概率的概念来定量的客观的描述可靠性。概率是个数学概念,它表示不确定的随机事件出现的可能性的数字标志,是刻画随机事件在试验中发生的可能性程度。我们把必然发生的事件的概率规定为1,把不可能发生的事件的概率规定为0,那么一般的随机事件发生的概率就在0和1之间。系统完成特定功能的概率越大,则可靠性就越高。系统的元件、部件和设备是构成系统的要素,它们的量值误差,性能的稳定性问题都是可靠性研究的对象。系统的可靠性,不仅决定于系统的要素的可靠性,而且也决定于系统要素组合的可靠性。第二,可靠性定义中“完成特定的功

能”是指系统的目标。当系统不能完成特定的功能时,就说明它出了“故障”。故障有以下几种:系统不能运行,如电视机的电子管灯丝烧断;系统的工作不稳定,如电视机的图像变动,忽隐忽现;系统的功能退化,如显象管的亮度减退等。分析研究系统的可靠性,必须弄清“故障”的具体内容。因为系统的功能总是随时间而变化的,完成特定功能对于“规定的时间”才是有意义的。对于不同的系统,时间的要求差别很大。例如,火箭的运行时间只有几分钟,而海底电缆系统的运行时间长达四十年。完成特定功能的“特定时间”,也叫做任务时间,它是计量系统可靠性的一个极为重要的因素。定义中“规定的条件”是指系统的运行条件和环境条件,包括所有物理的、化学的和人一机系统,以及使用次数、放置时间、运转累计时间等时间因素。

从可靠性的观点来看,即使复杂系统中一个引线的折断,都可能造成飞机失事、导弹不能发射的严重故障。因此可靠性的意义不在于系统中各个元件、部件、设备的故障性质及其产生的影响,而是着眼于系统整体功能受到障碍的次数多少,是在任务时间内完成功能的概率。

系统可靠性的研究,是本世纪四十年代随着飞机、火箭和宇宙的开发,特别是现代电子技术的发展而产生的。第二次世界大战中,自认为有高超军事技术的美国,在许多地方暴露出弱点。如美国运送到远东的武器中,有60%的飞机不能使用,50%的电子设备在库存阶段就已损坏;轰炸机的电子设备的寿命仅有20小时,海军的电子设备70%有毛病。这些事实使美国政府感到震惊。在军用和民用两方面的推动下,开始了可靠性的研究。1943年以后相继成立许多可靠性研究组织,如电子管开发

委员会(1943年),电子管委员会(1946年)、航空无线电公司(1946年)、空军器材司令部(1947年)、空军研究与发展司令部等。美国国防部和三军中相应建立了可靠性的研究小组和咨询小组,提出了一系列可靠性研究的成果和建议。军方的研究影响到整个工业界。1954年在纽约召开了美国第一次可靠性和质量管理专题讨论会。此后,由美国每年召开可靠性的国际会议。六十年代建立了可靠性工程的学科体系,成为一门综合性的边缘学科。内容十分广泛和复杂,主要是从物理学的角度探索对象系统故障原因的机理,并在此基础上预测系统的可靠性,对可靠性的管理作出有效的保障。具体内容包括:研究系统元件、部件和设备发生故障的物理原因,如磨损、老化、腐蚀等,针对这些问题提供防止故障的方法;用试验和数理统计方法研究系统的可靠性参数,如平均寿命、故障间隔时间等,为系统设计提供依据;研究系统的可靠性设计,利用已有的要素最大限度地构造高度可靠的系统;研究如何从规划和使用方面提高系统的效率、可靠性和可维护性等指标的问题。

二、可靠性的评价尺度

1. 可靠度和故障率

可靠度不是表示系统在某一确定时刻的状态的,而是在任务时间内完成功能的概率。在新的系统投入使用后,随着时间的推移,对该系统使用前途的期待程度就是可靠度。实际上可靠度可以用任务时间内每单位时的故障数(即故障率 λ)、或平均故障间隔、或故障平均时间来求得。

系统的实际可靠度 R 是由系统的设计、零部件、材料、设计

方法等因素决定的固有可靠度 R_i 和由管理、保养、环境等使用条件决定的使用可靠度 R_u 的乘积构成,即

$$R = R_i \cdot R_u$$

系统在一定时间内发生故障的概率,称为系统的故障率,用 F 来表示, F 是 t 的函数,那么系统的可靠度也是时间 t 的函数,则有

$$R(t) = 1 - F(t)$$

上式说明,可靠度就是不发生故障的概率。这个关系式叫做可靠度函数。令 $F(t)$ 的密度函数 (即单位时间内发生故障的概率) 为 $f(t)$, 则在 t 时间内有效的系统于下一个瞬时 Δt 时间内产生的故障概率为

$$\lambda(t) \cdot \Delta t = \frac{f(t) \cdot \Delta t}{R(t)}$$

式中的 $\lambda(t)$ 叫做瞬时故障率。系统发生故障过程随时间变化的典型曲线,类似于浴盆(见图 7.14),故称浴槽曲线。这个曲线说明,在系统运行的初期和磨损期产生故障的概率比较高;而系统的正常运行期间则产生的故障比较少,是偶发期。因此,在故障发生的初期,必须及时地纠正系统运行程序上的错误,尽快地

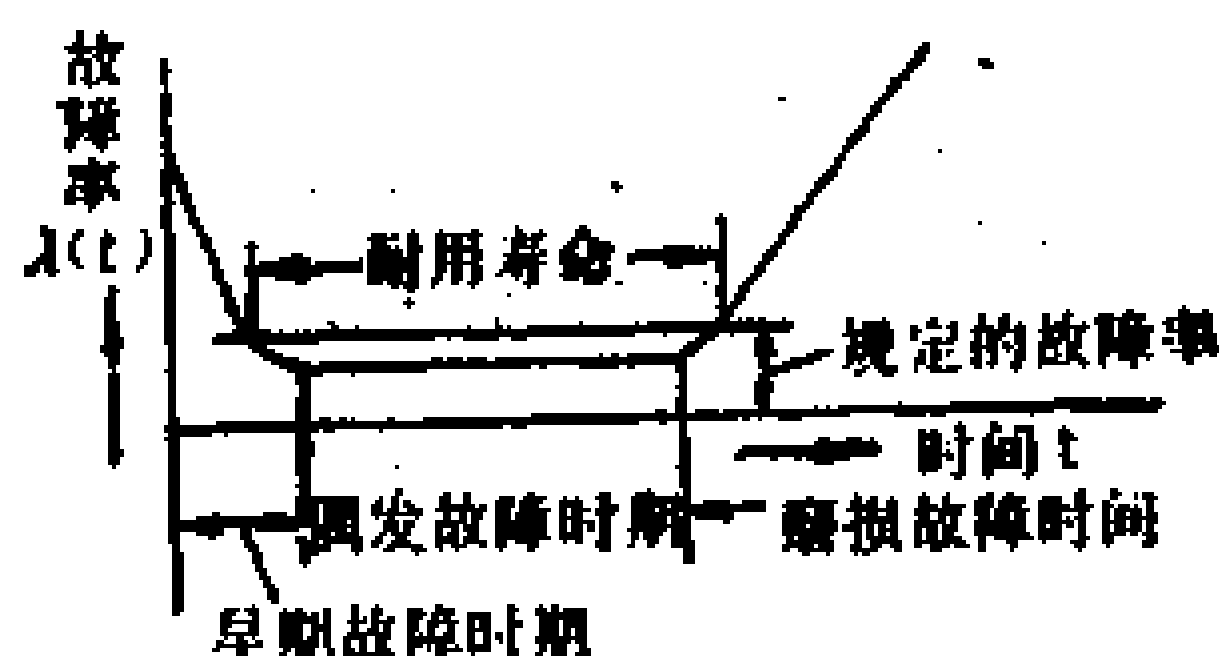


图 7.14 故障率曲线

排除故障,提高可靠性,以便在稳定的状态下使用系统;而当系统进入磨损初期,必须及时了解系统部件的可靠性,维护保养,以便延长系统的寿命。

2. 保全性和可用性

当系统发生故障时,能够对系统的部件进行替换和修复,这种情况叫做事后保全(CM)。在系统的运行中为了防止发生事故造成重大损失,而需要有计划地进行事先检查和调整,这种情形叫做预先保全(PM)。表示系统的这种保全的难易程度,叫做系统的保全性。

系统发生故障,不能实现其功能的时间,叫做停机时间;能够工作的时间叫做开机时间。这样,对于可以保全的系统,它的开机时间在整个时间内所占的比重,就是系统的可用性,即

$$\text{可用性} = \frac{\text{开机时间}}{\text{开机时间} + \text{停机时间}}$$

系统的保全性通常用系统的平均维修时间来量度;系统的可用性用系统的开动率来量度。两者都可以用来量度系统的可靠度。

3. 系统的串联与并联

系统是由许多零部件组成的,当其中任何一个零部件发生故障时,都会导致整个系统发生故障,那么系统的这种组合方式,叫做串联方式(见图 7.15A)。

设系统各零部件的故障率为 $F_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$ 各零部件的可靠度为 $R_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 则

$$R_i = 1 - F_i$$

若系统的故障率为 F_s , 则系统的可靠度 R_s 就是各零部件可靠度的乘积:

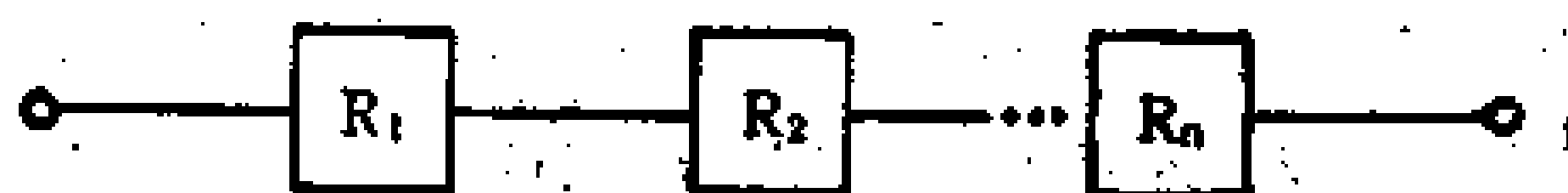


图 7.15A 串联系统

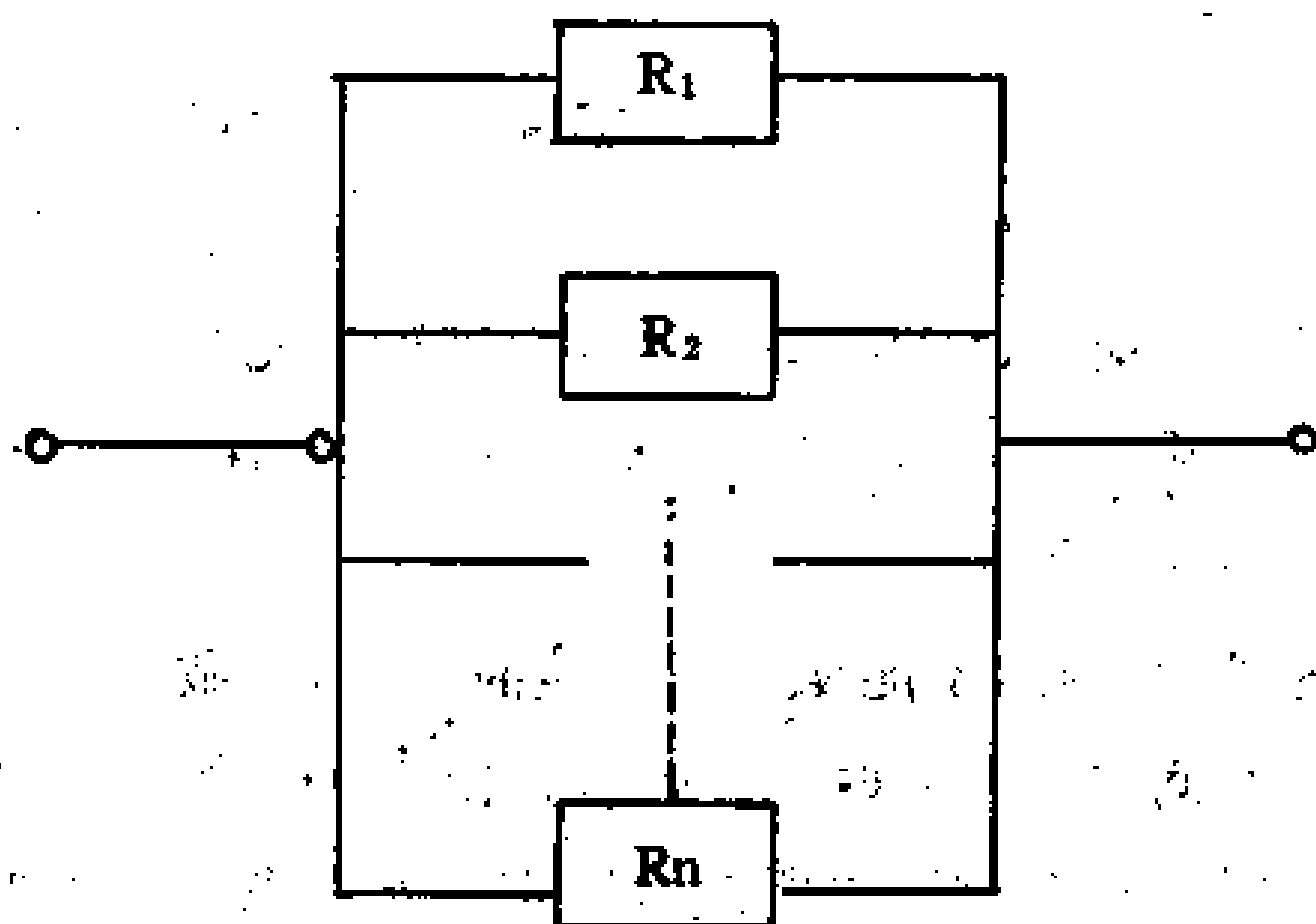


图 7.15B 并联系统

$$R_s = 1 - F_s = (1 - F_1)(1 - F_2)(1 - F_3) \cdots (1 - F_n) \\ = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdots R_n$$

很多系统是不附带零部件的，所以各零部件的故障可以认为是独立发生的，因此上面这个公式是用于预测串联方式的系统可靠度的基本公式。由此式可知，当系统的零部件数目 n 增大时，系统的可靠度就会急剧地下降。

为弥补串联方式当零部件 n 增大时系统可靠性急剧降低的不足，就必须提高零部件的固有可靠性，或者对其中可靠度低的零部件准备备用件，并联方式可以解决这个问题（见图 7.15B）。若系统各零部件的可靠度用 $R_1, R_2, R_3, \cdots, R_n$ 来表示，则

$$R_s = 1 - F_s = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3) \cdots (1 - R_n)$$

用这种并联的方式，即用备用零件或备用装置以提高系统的可

靠度，就叫做冗余度。上面这个公式是用来预测并联方式可靠度的基本公式。从这个公式可以知道，备用件数量 n 增大时，系统的可靠度就急剧增大。

4. 系统冗余度和可靠性的分配

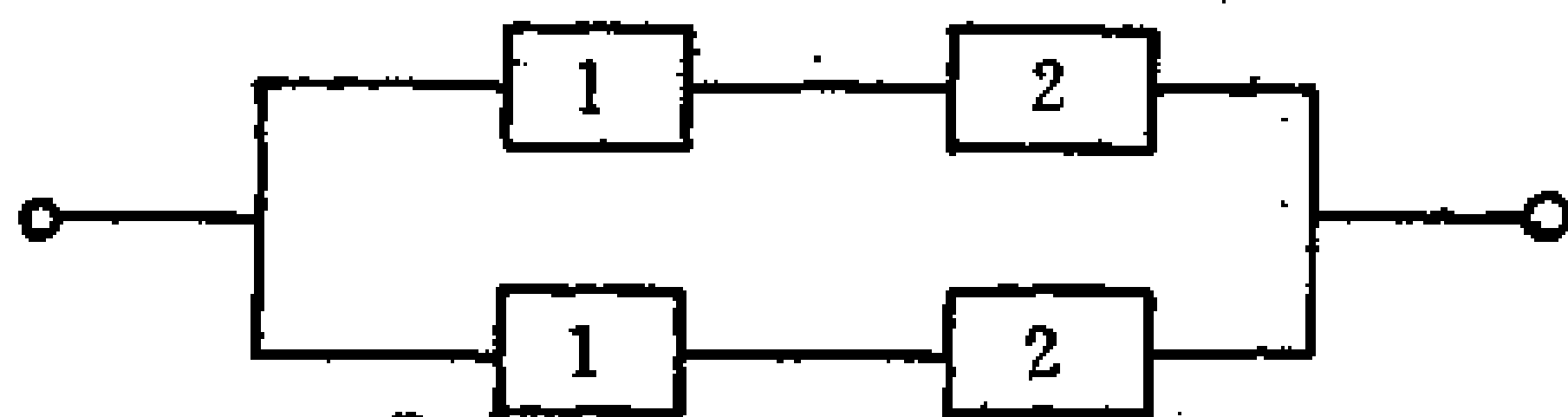
如果把包含备份的装置加入到系统之中，就会使系统有了冗余度，并能提高其可靠度。例如把可靠度为 0.9 的三个零部件并联起来，使系统有了冗余度，则系统的可靠度为

$$R_s = 1 - (1 - 0.9)^3 = 0.999$$

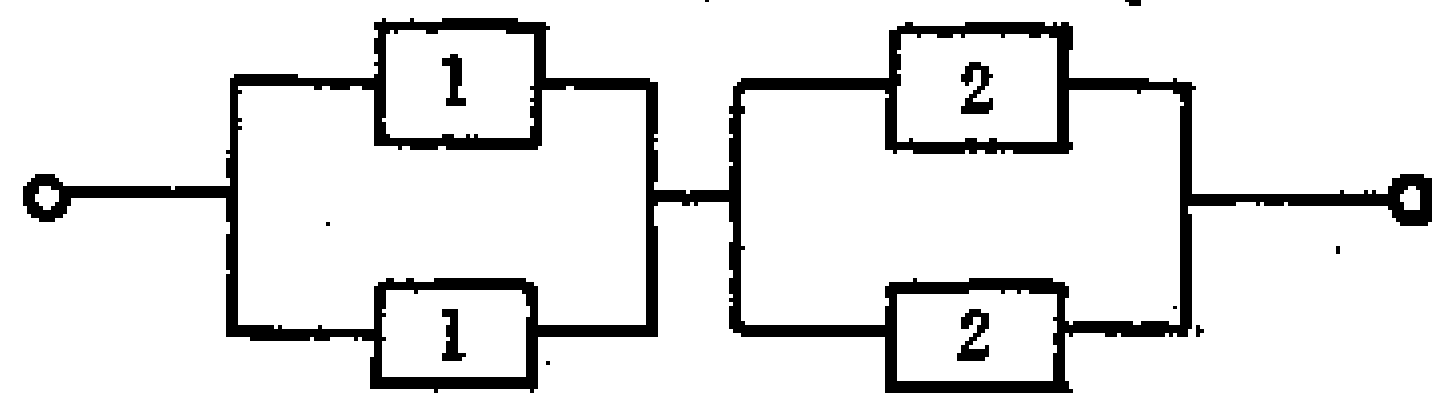
这样就大幅度地提高了系统的可靠度。

在火箭发射时，由于重量、体积、费用等受到严格限制，需要把各种各样的系统要素组合起来构成有很高可靠度的系统，这种可靠性的分配研究，是很重要的。近年来不少人利用数理规划进行了这种研究。

我们来分析图 7·16 中的两个冗余系统 a 和 b 。从上述计算可知



(a)



(b)

图 7·16 系统的冗余

$$Rs_a = 1 - (1 - R_1 R_2)^2$$

$$Rs_b = [1 - (1 - R_1)^2][1 - (1 - R_2)^2]$$

比较两种结果，显然系统 b 的可靠性更高。可见由同样零部件组合的系统，由于组合方式不同，其可靠度也就不同。

此外，除了采用并联冗余方式外，也常常采用待机冗余的方法，即在两个零部件中令其一方作为预备件，在不承受任何负荷的情况下作好待机准备，如果在运行中的零部件发生故障就可以马上把它补充上去，从而保持系统的正常运行。

三、可靠度设计

在设计系统的可靠度时，必须确定系统应该达到的可靠性，即可靠度目标。根据这个目标，再进行可靠度的试设计。当这个目标无法达到时，就需要对这个目标加以修正。

对于机器系统的设计，应根据机器的不同目的，其可靠度有所不同。对于那些一旦发生故障就会危及人的生命的系统，必须要有极高的可靠度，因此系统的各个零部件也要有极高的可靠度。但是，有时为了提高很少一点可靠度，往往要付出很高的费用。因此对于那些出了故障不会危及人的生命的系统，其可靠度的要求可以相应低一些。此外，实现系统的可靠度还有技术性的限制和经济条件的限制，需要对系统的目的、经费、技术等制约条件作了充分考虑之后，在系统的开发者和使用者之间相互达成妥协之后，才能决定所要求的系统可靠度。

所谓可靠度设计，是指按现实条件所要求的可靠性原则进行的设计。进行可靠度设计时，首先必须确定分配构成系统的各个零部件应有的可靠度。如果现有零部件的可靠度不能达到

所分配的标准,必要时,可以采用适当的冗余连接来弥补有关零部件可靠度的不足,有时,也可以通过改变系统结构的办法来解决,或者重新研究和开发高可靠度的零部件。

在进行可靠度设计之前,首先要确定可靠度目标。开发新的产品,很少有一次成功的,不改进设计,就很难提高系统的可靠度。从试验、开发、完成、使用的各个阶段里,要仔细斟酌系统装置的使用条件、保养难易、保养技术、技术水平等,在零部件的选用、电路选用等方面进行改进。为了使设计成功,减少弯路,在设计时要注意以下几点:要分析同类系统发生故障的情节、原因、影响、概率等;要使用标准化的零部件,熟悉其性能,便于获得正确数据;要尽量使系统的结构简单,一般地说,系统越复杂,则可靠度越低;要避免制造和使用上容易出错的结构;要经常评价技术水平;按零部件的不同要求和经费、期限、技术条件适当分配零部件的可靠度;必要时采用冗余结构;设计的结构要便于检查、保养和使用;明确使用环境条件和功能限度;确定理想的贮存条件和贮存期限;确定适当的包装,减少途中损失;对零部件生产的承包者加强监督;要明确任务时间是可靠度的重要因素;指明预防保养零部件,及时更换磨损件。

可靠度设计所必须的情报来源有三个方面:一是通过系统的模拟实验进行实测;二是从文献资料中查找;三是从系统使用中、故障和维修中收集资料。

四、可行性分析

系统的决策方案,必须具备经济上、技术上和政治上的可行性。可行性的分析主要用于技术、经济、社会发展的决策系统。

在系统分析中最难于把握的问题是政治上的可行性，这是指某项决策方案或政策被接受和贯彻到底的可能性。政治上的可行性往往是暂时性的，它的变化往往很难预见。自然的或人为的灾害所产生的副作用，往往会改变政治可行性的环境。例如，由于空中民用飞机相撞，或者边界遭到侵犯，都会改变飞机安全系统的可行性。

经济可行性是指通过投资、成本和盈利的分析，确认系统开发是否有可利用资源的可能性。技术的可行性是指达到系统的科技目标的可能性。经济上的可行性在很大的程度上取决于技术水平，而技术可行性反过来又取决于预算的多少。通过对系统的经济、技术可行的研究，对政治可行性的肯定或否定产生影响。

对于工程系统项目的可行性分析，可以按照工作程序和内容划分为四个阶段。

1. 机会研究

机会研究是可行研究的一种类型，它的内容比较简单，分析的深度较为粗浅。机会研究的目的是鉴别一项投资是否会有成功的可能。机会研究一般分为地区分析、部门分析和资源分析。分析一项工程建设，就要对它的背景、基础、条件等方面进行调查和分析核算，如资源的开发、利用和分配；工艺技术情况，同国外国内的比较；重大的科研成果；产品方案和企业规模等。机会分析工作的精确度一般只需达到 30% 左右。

2. 初步可行性分析

它是在机会分析的基础上，进一步探索投资的范围而进行的分析研究工作，其目的是在拟定进行投资的情况下，寻求和选

择投资方案，为投资决策提供科学的依据。要广泛开展调查研究，并针对一种系统开发项目的有关因素和条件作分析核算工作，如生产的市场需求预测；对原材料、动力、协作件、配套件、交通运输等条件的分析；对产品的生产、销售的管理系统的分析，对投产后的盈利分析、对建设规模的技术经济分析等。

3. 详细可行性分析

它是技术经济的可行性分析，是整个可行性分析的关键环节。这种分析的目的在于详细拟定最佳的建设方案。它要对各种建设方案，包括资源、技术、相关条件、投资、成本、盈利等方面，进行调查和分析比较，确定最优方案。详细可行性分析的精确度，要求达到 10% 以内。

4. 评价报告

评价报告是在详细可行性研究的基础上做出的，其目的是对工程系统作技术经济评价，作出投资决策。有的可行性分析报告，还需要附上一些专题报告，如工艺技术、市场调查、厂址选择等。

第八章 系统技术

在系统分析的基础上，为了实现系统的最优控制、最优设计、最优决策、最优管理，还必须相应地运用一定的方法和借助于一定的手段。这些方法和手段就是系统技术。在本章中，仅介绍其中一些最基本的技术方法，并着重于领会这些技术方法的思路。

第一节 系统的分解与协调技术

一、分解与协调思路

系统科学所研究的实际系统，是属于复杂的大系统。大系统是属于多变量系统。究竟用什么方法来建立系统模型，处理那些规模庞大、结构复杂、因素众多、目标多样的大系统问题，以实现最优化的系统设计、系统决策和系统管理，最基本的思路和方法就是分解和协调。

系统工程中分解与协调方法做为一种解决多级递阶控制系统最优化问题的科学方法，是本世纪六十年代以后才逐渐形成起来的，而系统工程的“分解”概念最初是在数学规划问题中援引出来的。从哲学方法论的角度看来，分析也是一种分解，因为

分析是存在于人的思想过程中，把复杂的事物和关系分解为各个要素、部分。在希腊文那里，分析与分解都是用同一个词，都是指把事物或现象分为简单的组成部分。而综合则是在人们的思想中把事物或现象的各个要素、各个部分联合在一起看成一个统一的整体。在辩证唯物主义看来，分解方法与综合方法存在不可分割的对立统一的关系。恩格斯曾指出：“思维既把相互联系的要素联合为一个统一体，同样也把意识的对象分解为它们的要素。没有分析就没有综合。”^①列宁也非常强调认识过程中分析与综合的辩证统一，他在《黑格尔〈逻辑学〉一书摘要》所论述的辩证法十六要素中就指出过“分析和综合的结合，——各部分的分解和所有这些部分的总和、总计。”^②就分析与综合的关系来说，分析是综合的前提，仅有分析还不能提供对事物整体的认识，只有通过综合才能达到对事物整体认识的目的。然而对于系统科学来说，其顺序正好相反。当我们研究一个系统的时候，首先总是把它作为一个整体，如果是作为一项工程，则系统工程总是从一个总体目标出发，借助于现代科学技术以至管理科学和其他社会科学的成就，通过分析，规划、组织、协调，以至设计出一个工程系统，使之在总体目标的某些预先确定的性能要求和指标上达到最优。因此，按照系统工程的认识程序来说，总是从综合开始，经过分析，再进行综合，即“综合——分析——综合”的过程。这后一个综合，已是经过整体协调的结果。所以在一定意义上可以说，分解与协调是哲学的分析与综合辩证思维方法在系统工程中的具体体现。

① 《马克思恩格斯选集》第3卷，人民出版社1972年版，第81页。

② 《列宁选集》第2卷，人民出版社1965年版，第581页。

随着大系统优化研究的进展,现在不论是工程系统、社会系统、生态系统还是生命系统,在结构上都有它的同型性,在控制关系上也都有它的可比性,因而人们发现大系统的分解协调方法已越来越成为一种普遍适用的系统设计技术的方法论基础。系统的分解与协调概念也正是随着大系统最优化理论的形成发展而建立起来的。

二、系统的分解

任何大系统,不管是经济系统,工程系统,还是生态系统,人体系统,我们都可以分成若干部分或层次;对于时间过程系统,可以分成若干阶段。如何将对象系统按不同层次或阶段,以至逐个地把组成系统的要素或子系统区分开来进行分析,使复杂的整体大系统,变换为许多简单的小系统,这就是系统的分解问题。一个复杂的大系统如何通过分解简化为一目了然的子系统,这对于认识整体系统,作出决策,以及协作配合都关系极大。而现代对大系统的分解,实际是贯穿于从系统分析、设计、决策以至系统控制管理全过程中,系统分解大体可以分成几种情况。

1. 按空间结构关系进行分解,这是系统分解的常见方法。一个大系统,按空间关系可以划分为若干个相互关联的子系统,而对于同一级的子系统,它们在过程上没有严格的先后顺序关系。比如一个国家的区域划分,可以按自然条件、交通条件、资源条件,以至其他民族特点等传统原因划分为若干个子区域,它们都是次级子系统,彼此之间属平行关系。在技术系统中,如一个柴油机发电站,就可以按物性划分为燃油系统、机油系统、起动系统、排气系统、冷却系统、电气系统等相对独立的各个子系统,它

们彼此之间虽有联系，但基本也是平行关系。这种划分概念明确，线条清楚。

2. 按系统总目标或总任务进行分解。这基本是属于按整体功能目标划分为部分功能目标或任务，或是按工质流动程序进行划分。比如制鞋是总目标，可划分为鞋面切割缝合、装配、打光和检验等若干工序，每道工序由一个车间完成，就是一个子系统。一个火力发电厂可按工质流动各阶段任务划分为输煤、除灰、通讯、照明、上下热水网、构筑物与建筑物等一系列次级系统。一个大型钢铁联合企业，又可分为选矿场、烧结厂、炼铁厂、轧钢厂等，一道工序由一个分厂完成，任务明确，目的性强。这种划分是基于同一事物，存在着不同的系统研究任务，每一个分任务，子目标，可以作为一个要素，一个系统，甚至是一个复杂大系统。而在这些不同的子目标完成过程中，表现了不同的系统属性和功能特点，它们与环境的相互关系（或耦合）及其复杂程度均不相同，甚至区别很大。这种按目标和任务进行功能分解的方法，是系统分解的一个基本环节。

3. 对系统模型关联的分解。明确分解大系统各子目标的任务之后，要实现最优化决策还要借助于建立模型。首先是建立框图模型，即用图示方法或图表方法反映各子目标的相互关系，进而根据掌握的资料，建立定量描述的数学模型，第三步将数学模型转换为计算机语言。在实际系统中，就是将总目标的函数分离为各子目标函数的总和。比如研究总的利润、总成本、总的能量消耗、总的环保支出等，对这些相互关联目标的分解之后，要借助数学模型予以定量描述。但往往由于各子系统之间相互影响，如加强环保要增加能耗，增加成本，减少利润，这就要求在

建立大系统数学模型时,必须反映这些相互关联的程度和过程,按关联关系的不同强度对大系统作合理的分解。因此在大系统研究中,模型关联的分解就是研究系统分解的一个主要问题。

4. 多级系统控制过程的分解。对系统的分解,不仅在于明确目标和建立模型阶段,同时也考虑便于系统工程施工以及进入运行阶段的控制和管理。在工程系统中,一个完整的控制问题在进行控制过程中还必须变换为一族控制的子问题,然后采取不同质的方法给予解决。这种多级系统控制的分解程序又可分为几类,或基于系统结构的分解,也即是按系统的物理性能或操作状态划分的子系统,象一个制造机械产品的工厂,分为木模车间、铸造车间、锻造车间、冲压车间、机加工车间、热处理车间、装配车间、检验车间等,正是基于系统结构的物理性能以及操作状态的工艺流程连续性和便于控制的特点出发来分解的。另一类是基于控制层次的分解,即是按照系统影响的大小来划分层次,高层次的系统比低层次的系统具有较大的优先权,正象国家行政管理系统中,在中央之下的省一级高于专区一级,专区一级又高于县一级;在商业系统中,公司、批发部、门市部、供销点;工厂里从厂长、科室、车间到班组,正是基于影响的大小不同而区分的系统控制层次。再一类就是基于控制性质的分解。这涉及不同性质的系统应有不同控制方法。象动力系统就是根据电力输送过程经历发电、高压输电、配电网降压、最后用户负荷等环节来分解,各环节既互相关联又有不同控制性质,这是分解的依据。总之,这种分解是基于方便控制的角度出发。

如果就系统的目标函数而言,大系统应可分解为 N 个子系统,即总目标是可以分散的,这是进行系统分解建立数学模型的

先决条件。其函数表达式是：

$$J = \sum_{i=1}^n J_i$$

其中：\$J\$ 为大系统总目标函数，\$i = 1, 2, \dots, n\$。

\$J_i\$ 为子系统目标函数。

但在实际的系统分解过程，不管属于哪一类型的分解，模型关联分解始终是主要的。下面介绍两种系统分解方法。^①

第一种：非现实法。

这种分解方法是“假想”切断各小系统之间的模型关联，而引入非现实的“伪变量”来考虑实际关联的影响。

大系统的多维数学模型——状态联立方程组是：

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \\ \frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \\ \vdots \\ \frac{dx_n}{dt} = a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n \end{cases}$$

引入“伪变量”后，在形式上就可以将大系统的状态联立方程组分解为各小系统的低维数学模型——独立的状态方程：

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{ii}x_i + \varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

式中：

$$\text{伪变量 } \varphi_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

这样，就可以利用经过简化而成为形式上无关联的低阶状态方程，即简化模型进行各子系统的分析与综合以实现最优化问题的处理，以及考虑“伪变量”与实际模型关联不等效而作必

① 参见涂序彦：《大系统理论的对象、内容和方法》，中国科协普及部《系统工程普及讲座汇编》（上），1980年。

要的修正。

第二种：现实法。

这种分解方法不是“假想”切断模型关联，而是将关联变量预先设置为某种估计值，并且尽可能地设置在实际关联的最优值相近的范围内，设估计关联量为：

$$\xi_{ij} = a_{ij}x_j \quad i \neq j,$$

并命：

$$\xi_i = \sum_{j \neq i}^n \xi_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n。$$

由此可将大系统的联立方程组分解为各小系统的独立方程：

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{ii}x_i + \xi_i \quad i = 1, 2, \dots, n。$$

从而根据通常方法求出子系统局部最优化解。上述大系统理论所应用的“分解”方法是多变量控制理论的“去耦”方法的发展。实际上，“去耦”就是一种特殊的分解方法，即利用控制系统之间的相互并联，抵销被控制对象的相互关联，将多变量大系统分解为独立的单变量小系统（也即上述子系统）。

系统的分解既可以从建立数学模型的过程中，为便于计算进行分解，也可以从便于管理等角度进行分解。所以，系统的分解不是一个单纯的理论问题或数学问题。原则上讲，一个大系统的分解可以有很多的分解方案，而实际可行的分解方案则总受到天时、地利、人和以及工程中的任务性质、物理过程、运行方式、工质与工艺特点等具体条件的限制，不存在唯一的分解模式。一个大系统即使从决策以后，进入设计、试验、施工生产和运行整个管理过程，往往各阶段要求不同，还可以作多种分解和调整，对于不同阶段和不同子系统，分解方式又各有侧重，有时

需要把多种分解方式结合起来。只有科学合理的分解方案和各種分解方法的恰当运用,才能更有利于系统的协调控制和管理。因而可以说,对系统的分解实际是一种艺术。

三、系统的协调

将系统的目标、模型、控制关系进行分解,这是对复杂系统的简化,也是系统实行分散化控制管理的基础。但是系统分解的结果,不论是自然的,工程的,还是社会的系统,按系统各相互关联(即耦合)关系,将产生一族相对独立(即相对不耦合)的子系统。显然,当研究这些子系统的子目标、子模型问题时,是暂时不计及该子系统与其它子系统的相互作用。而实际上它们彼此是存在着关联关系的。尽管各子系统可以采用各种不同的优化技术对于系统的目标实现局部的最优化,但子系统是大系统的有机部分,它的优化又受到上一级系统及相互关联的其他子系统的限制,也即局部优化与整体优化存在着一个协调问题,这是系统研究过程最难处理的问题。因而就需要在系统分解的基础上进行第二步的工作,即全面处理各子系统相互作用问题的调节和控制,这就是系统的协调。一个规模庞大的系统,只有在系统的动态过程中达到各方面的真正协调,才能出现整体上的步调一致,充分发挥系统的整体功能,以实现系统整体的最优化。

协调问题对于经济的发展是非常重要的。我们说社会主义制度的优越性之一就在于我们实行全民所有制,有可能贯彻有计划按比例发展国民经济的方针,这就最有利于国民经济各部门的协调平衡,可以避免资本主义制度下,由于私有制带来生产无政府状态所必将导致的那种经济危机。但是如果我们不能深

刻认识社会规律与自然规律及其关系,急于求成,人为地加速某一个部门的发展,同样会导致破坏平衡,使优越的社会主义制度不能发挥它应有的作用。

特别是由于现代管理的复杂化,系统涉及的不确定因素很多,各个决策层次之间,若不制定非常明确的指令、指示、规则、指针等一系列有效的交流协调制度和原则,则管理上将会出现混乱。在产销方面,生产单位与用户也存在相互之间的协调问题。产销如果脱节,产品不符合用户的愿望和要求,则会出现滞销现象;现代设备更新周期加速,品种要求多样化,就更迫切要求生产单位与用户之间密切协调关系,以至建立产销之间交流协调的必要制度。

1. 系统协调的结构型式

系统的协调也就是系统的调节与控制问题,在“系统的控制

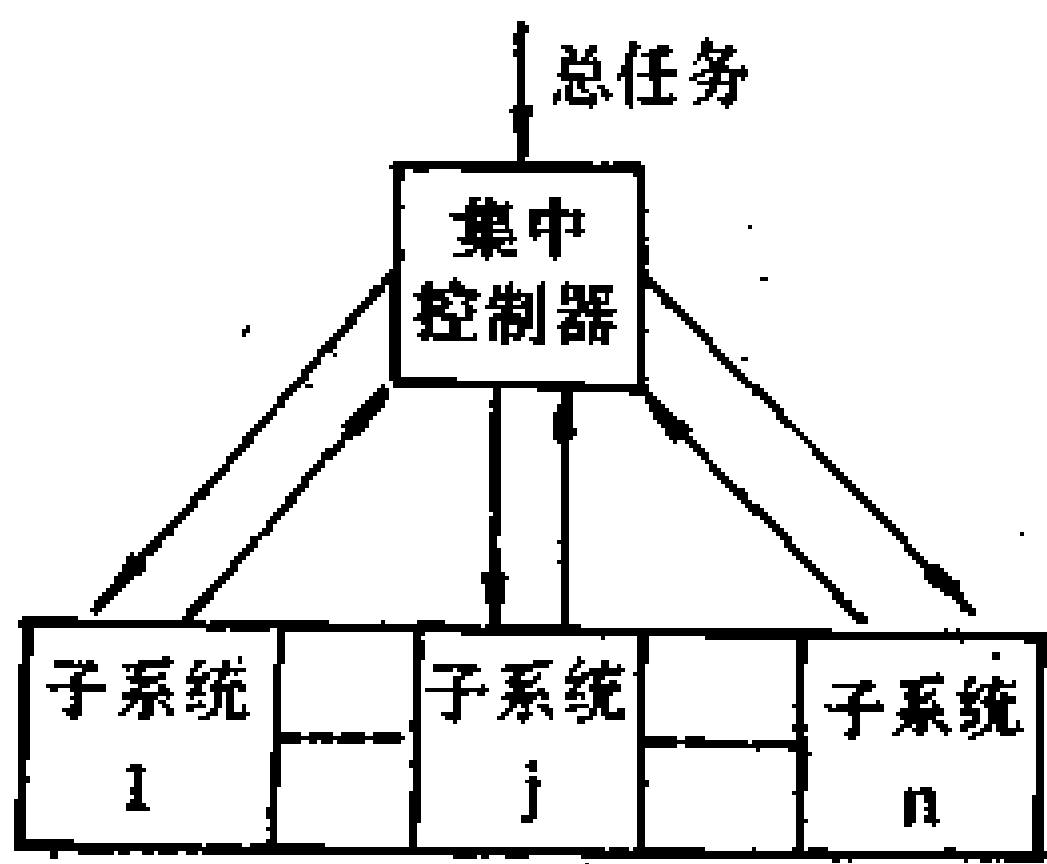


图 8.1 集中控制结构

与信息”那一章,已经讲到大系统控制的几种方式:集中控制、分散控制、多级递阶控制。但是,一定的控制方式,需要有相应的结构型式来实现对系统的调节与控制。

集中控制的结构型式,它是由一个控制中心,直接协调各被控子系统(或过程)的关系。

在现代管理自动化系统中,有的就是由一台大型电子计算机的中央控制室,直接对全过程和各部分进行集中检测和协调控制(见图 8.1)。

分散控制的结构，采取将大系统的协调控制任务分散给其所属的各个子系统，以就地独立完成协调控制的办法分头解决，从而达到大系统协调控制的目的。如果各个子系统的控制结构之间彼此没有任何相互的信息交换，则称为全分散的协调控制；如果各子系统的控制结构之间有关键的或主要部分的信息交换，则称为局部分散控制。分散控制结构如图 8.2 所示：

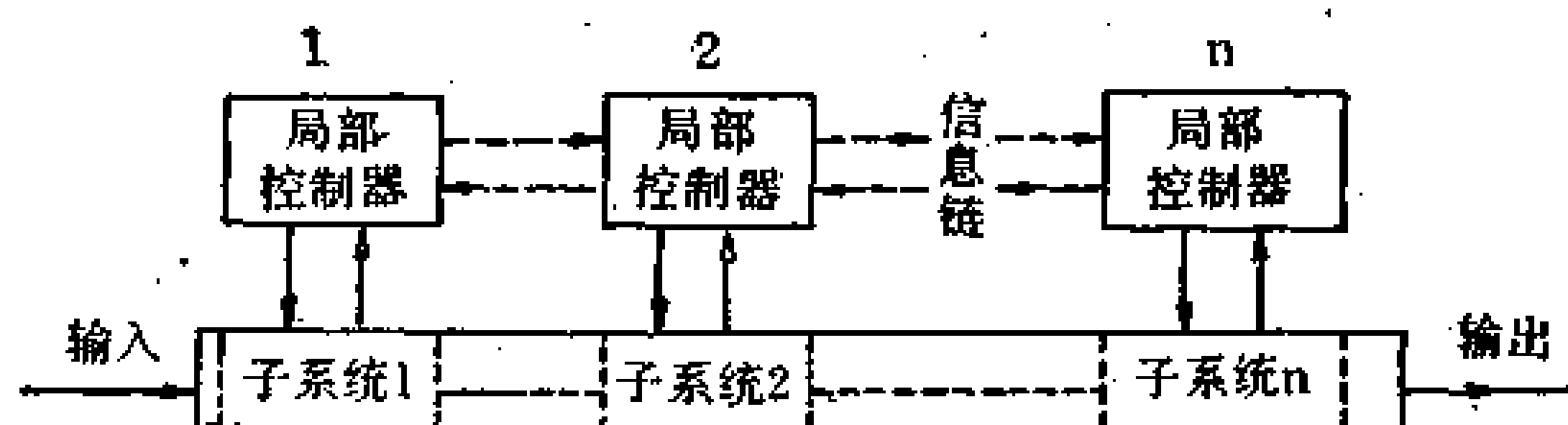


图 8.2 分散控制结构

这个结构图表示，它是由若干分散的控制器（或称控制机构）或决策者、操作者来共同完成大系统的总任务。各控制器是同级的，独立的，没有上下级关系，大系统通过只具有局部信息的各子系统局部控制器进行局部控制。通常在局部分散控制情况下为了协调，各局部控制器之间需要横向信息流（虚线）。

然而，我们应该看到，在现实大系统中，分散控制其分散也是相对的，有条件的，仅仅是指控制结构的特点而言。分散控制仍然是为了更大系统的协调控制，可以说一切局部的协调控制关系，总是存在于一定的控制层次的系列之中，都离不开一定的控制中心。各个子系统和低一级层次，必定要服从高一级系统层次的控制协调，也即服从大系统整体的控制与协调。多级递阶控制结构就是集中控制和分散控制相结合的产物。

多级递阶控制的结构（见图 8.3），在六十年代初期，美国和

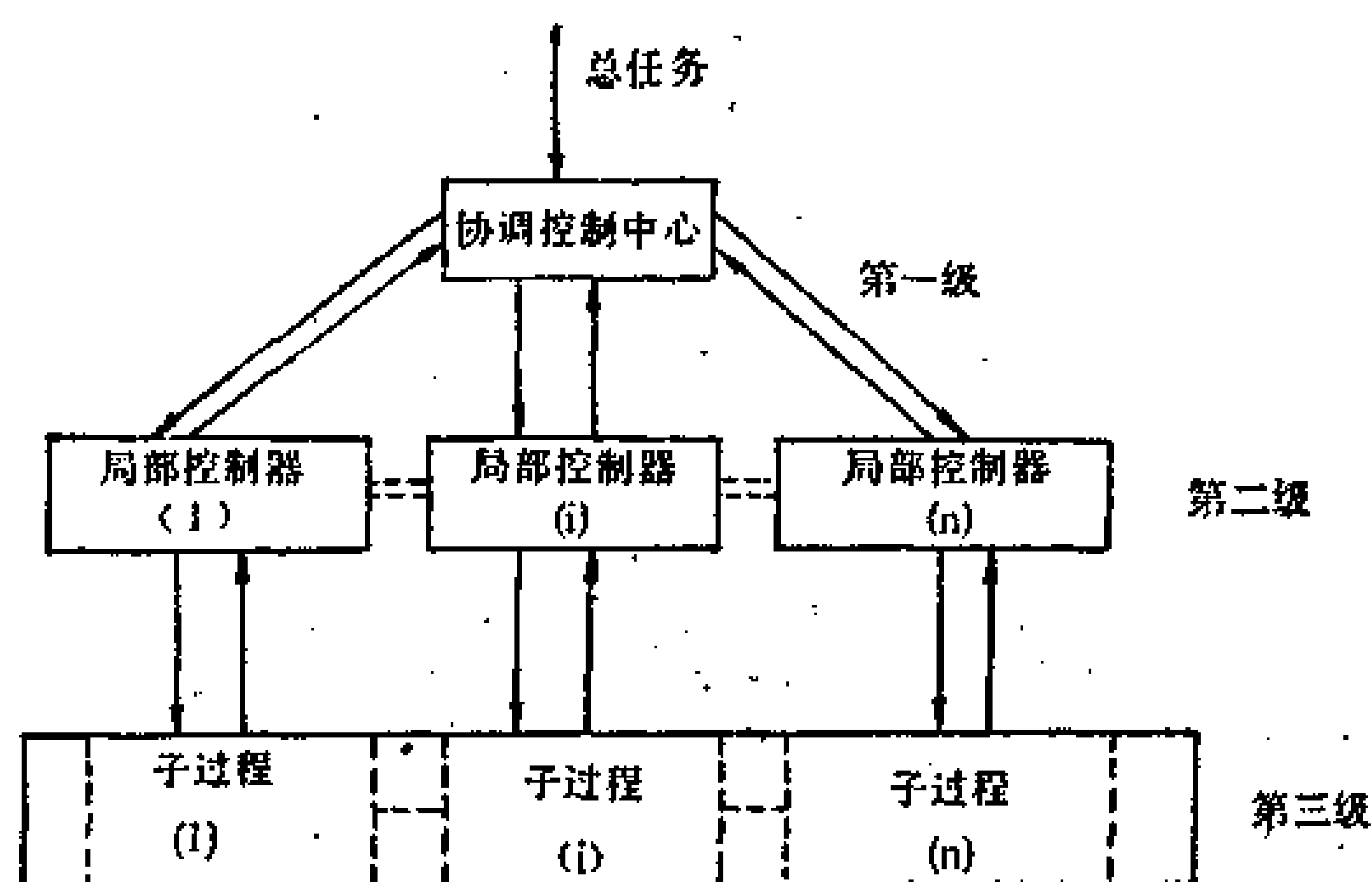


图 8.3 多级递阶结构

波兰开始有人首先研究，其基本思想就是将整体控制问题分解为一些子问题，对每个子问题抓住主要目的来设置控制器（类似社会系统设立协助控制的组织机构），这就构成若干子系统，相对于协调控制中心（第一级）来说，就是第二级控制。第二级控制器（在自动控制系统中如使用局部控制器或微型机）直接作用于第三级，即被控制对象或过程，以对直接生产过程这个更低级作出决策，完成局部最优化和自动化控制协调任务。它实际是承上启下，既接受上级的协调控制，又处理下级的协调控制。而第一级即最高级是协调控制中心，它可以是一台计算机，或者是一个协调机构，它根据大系统的任务和总目标，利用各种控制器（或机构）将各子系统积聚或联接起来，也就是通过控制器为中介去获得各子系统运行情况的信息，然后根据生产过程的物理规律，选择最优运行目标作出决策并传输信息给子系统，以实现对子系统运行的控制和协调，使整个子系统在最优状态下运行，

达到全系统最优化目的。图 8.3 只是一个简单关系图式, 根据系统的复杂程度, 可以类似地递阶至第四级、第五级……, 构成多级递阶控制系统。

但实际上在处理各种复杂大系统的协调控制问题时, 这种多级递阶的思路又可以区分为三种基本形式:

第一种, 多阶递阶(也有称多级递阶)结构 (Multiechelon Hierarchical Structure), 这是递阶结构最一般形式。递阶的划分是根据被控制协调的对象或过程的结构特征, 如工艺性质、管辖范围、生理形态等, 将大系统分解为分系统的阶层, 由于各阶子系统在运行过程中总是存在着若干相互矛盾的目标和问题, 较高阶的协调控制机构的责任就是去协调减轻各较低阶子系统之间相互作用的有害耦合。比如确定一些约束条件或约束的参数, 协调处理一些不确定性或相互矛盾的目标, 使矛盾向有利于大系统最优化的总目标方面转化。

第二种, 多层递阶结构 (Multistrata Hierarchical Structure), 这也是多级递阶结构的一种形式, 但有它的特点。多阶递阶侧重于多级关系上来进行协调控制, 而多层递阶, 虽然也以递阶为基础, 但侧重于从多层关系上来进行协调控制。在现代大系统控制理论中, 多层结构如图 8.4 所示, 其中第一层为直接控制层, 根据最优化层指令直接控制生产工艺过程或被控制对象的运行状态, 克服频率高、变化快的扰动影响。第二层为最优化层, 根据给定目标函数及约束条件, 借助系统数学模型进行最优控制。第三层为自适应层, 根据对象特性或运行变化对最优化层的目标函数、约束条件及数学模型进行适当修正以保持系统最优运行。第四层为自组织层, 根据大系统的总目标、总任务,

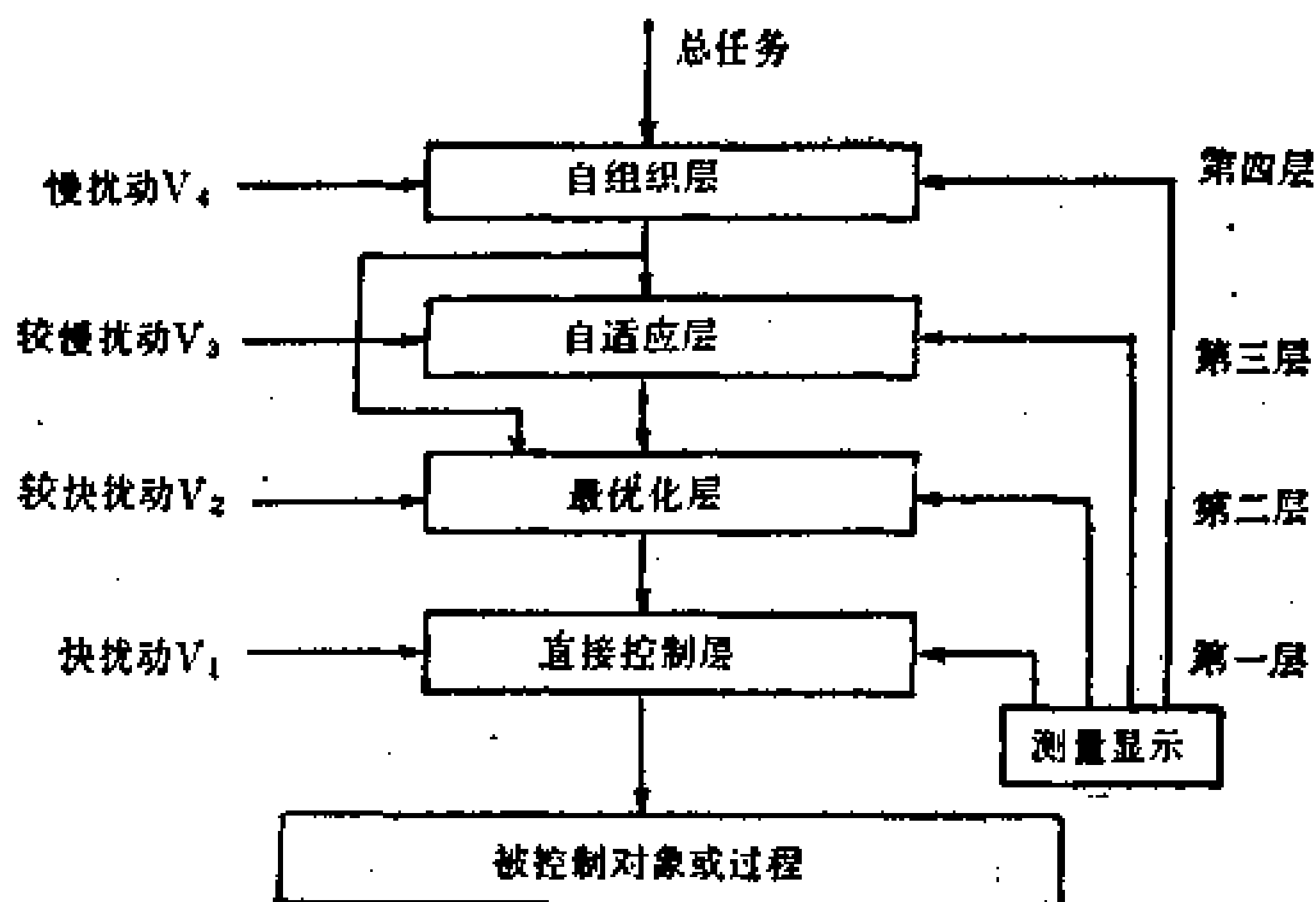


图 8.4 多层递阶结构

考虑环境变化制定决策、计划协调与组织管理。

这种多层控制方案的特点是,按任务或功能分层,因而较高层的功能、任务比较复杂,故其扰动因素的变化也比低层要慢,但一旦较高层的任务和功能起了重大变化,则往往对低层起着决定性影响。而较低层的功能、任务一般比较简单,因而扰动变化也比较快。低层的变化,又会反馈于高层,以至影响高层的决策。各层之间的关系虽有“分工”特点,但上下层之间又蕴含着“领导”与“被领导”的关系。在层次之间具有信息流,除了上层通向下层的信息流外,还有被控制对象或过程到各层次的反馈信息流。当然,在技术系统中,上层与下层也有只属任务、功能关系的分层,如电子系统中分为预防层,正常情况下保持系统的最优化与稳定化,预防事故的发生;恢复层,当事故发生后,对事故的处理和部分供电,实现恢复正常状态;紧急层,是指事故发

生时,采取紧急措施,以防止事故扩大化^①。电力系统各层间虽不是象社会系统那样有上、下级关系,但彼此之间也同样存在相互制约关系。

第三种,多段递阶结构 (Multilayer Hierarchical Structure),这类系统结构是根据被控对象的过程顺序来分段。如导弹弹道系统分解为起飞段,轨道飞行段、再入大气层段等,各段均相互衔接,对全程进行协调控制。其各段关系如图 8.5 所示。

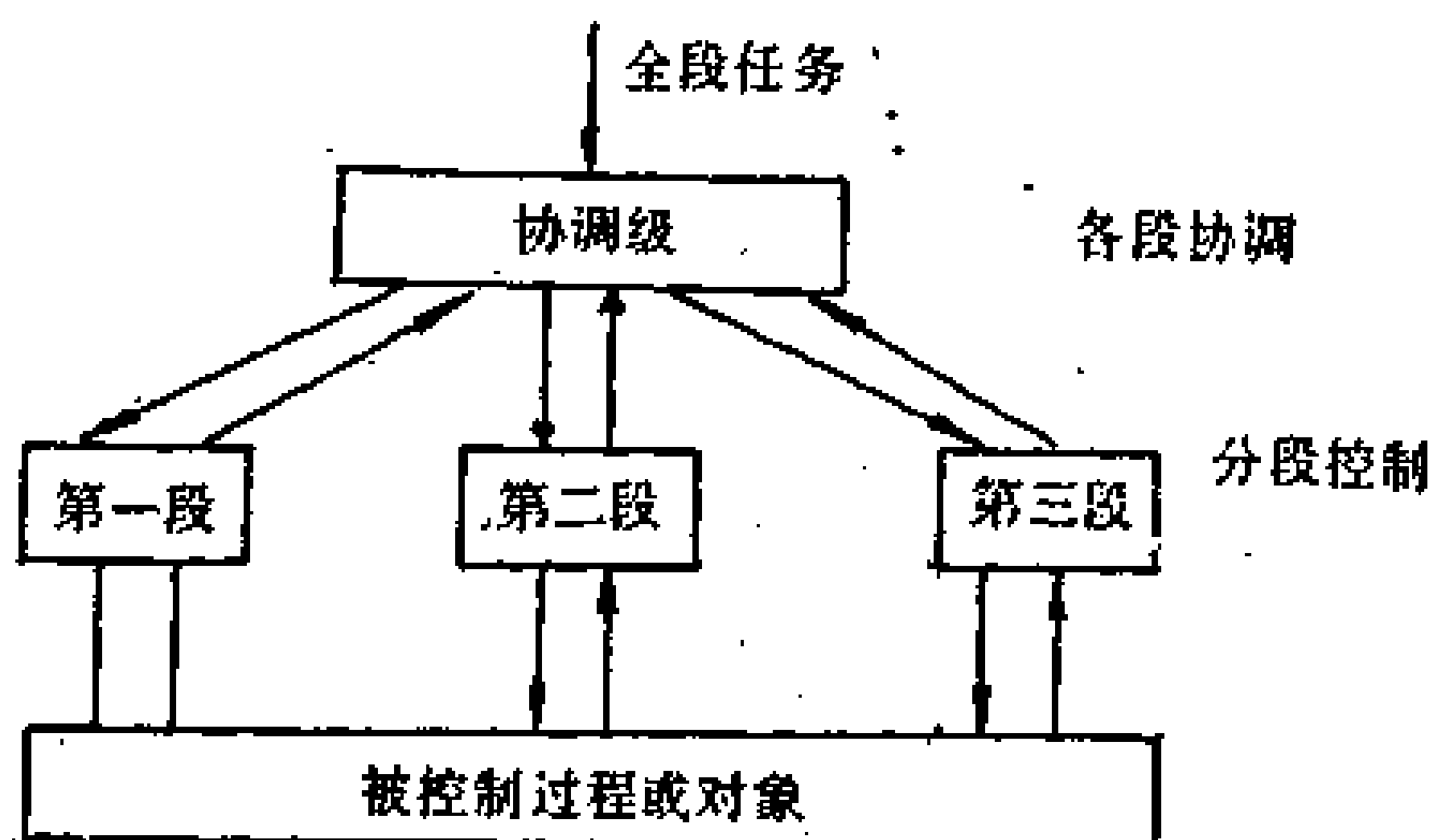


图 8.5 多段递阶结构

导弹弹道系统可以看作一个整体,各段是互相衔接的,应按衔接条件进行协调,即是把前一段终点的边界条件与后一段初始的边界条件衔接起来,这样就可以完成全过程的协调控制任务。因而既具有横向信息流,即相邻各段分系统的信息交换和实现控制是通过协调级进行的;同时,又具有纵向信息流,这是指上下级系统之间的信息反馈。

上面所举这些分段、分层、分级控制方案,简化了系统的协

^① 参见涂序彦:《大系统理论及应用》,连载于1980年《信息与控制》杂志。

调控制,不会由于局部的故障引起全局失灵,也便于采用中、小型以至微机进行处理,方便维修,使整个系统可靠性较高。这比起“一揽子”问题的解决都依靠集中统一控制的方案来,灵活方便得多,也减轻了对中心大型计算机的要求和负担,更符合经济原则。有时各种协调方案可以结合使用,如多段控制中,每段又可采用多级或多层协调控制方案。而采用任何方案最切实可行,得从实际出发,合理运用,以达到更有效地避免引起全局性的失误。

2. 系统协调的原则

现代控制论已发展到大系统理论阶段,大系统的协调控制是非常突出的问题,通常是大系统的总目标和总模型被分解为子目标和子模型之后,必须根据子目标和子模型的相互作用以及外部环境 with 制约条件的变化,来反复协调各子目标和子模型的关系,以至调整大系统的总目标和总模型。现在大系统研究已形成一些协调、控制的原则。如在研究目标协调与模型协调时,可以用“关联平衡”与“关联预估”等协调原则,以协调偏差进行反馈闭环控制。按照“关联平衡”原则构成的系统,协调机构(或称协调器)对各子系统实现调节控制的协调变量是根据各子系统局部优化需要的关联变量与实际关联变量相平衡而获得的偏差反馈信息来调整的。按照“关联预估”原则构成的系统,协调机构(或协调器)对各子系统或子过程调节控制是通过接收各子系统或子过程不断反馈的协调偏差信息自行预估一个协调关联量以进行协调控制。而在工程控制中为了消除多子系统相互关联造成的各个变量之间的相互影响,还提出了多变量控制系统的“自治调节”原则,从而使单变量的控制过程互不影响。如锅炉的排气阀,在一定压力之下自动打开调整压力,这种机械结构就是

属于控制系统的“自治调节”。在另一些情况下,不要求各变量控制过程完全“自治”,仅要求各变量控制过程相互保持某种“协调关系”。就是说,利用或加强对象间的有益耦合(相互关联),抵销或减弱有害的耦合,通过协调偏差以进行控制,使各变量与控制过程相互配合,实现多变量控制系统的全局最优化,这就是多变量控制系统的“协调控制原则。”在现代化的化工生产、电力输送系统、钢铁联合企业中,都不能简单地采取各个变量自治控制,而是要求各种成分或各部分的运行速度保持一定比例。社会经济系统更是如此,现代工业的污染问题非常突出,就是因为缺乏协调控制。象煤炭工业生产出来的腐植酸,排放于江河中,是一种污染源,但如果综合利用,它却是一种很好的有机肥料。再以生产化纤浆来说,木材是化纤浆的主要原料,但有的工厂木材利用率很低,大量的木材变成废液白白排入江河,污染河道,危害生态,这是一种有害的耦合。如果注意协调控制,充分利用废液中含有的许多经济价值较高的物质,则可以制成价值很高的高效药品和高级香料,提炼酵母和酒精,这就减弱或消除有害耦合,以至转化为有益的综合。在现代工程系统中,这类事例举不胜举。所以,如何善于综合利用,这实际也就是大系统研究中的协调控制问题。协调控制的原则,正是在处理一系列多变量复杂大系统问题中概括出来,反映了大系统协调控制的一些共同规律性。

总之,系统既然是庞大和复杂的,为了规划、分析或者控制,都需要把大系统分解为几个子系统。但是子系统之间相互关联,又相互矛盾。为了使系统总体以及各子系统都能充分地发挥它的功能,达到最佳的总体效应,就需要保持分系统之间的平衡关系,这就是协调问题。概括的说,系统的分解与协调方法就

是分两步进行,第一步分解,第二步协调。分解是简化系统,简化目标,简化模型,简化控制。协调是使各被分解的子系统、子目标、子模型、子控制过程,能够相互有机配合,相辅相成,以解决系统整体最优化问题。但分解与协调这两步不是绝对的、孤立的,互不相干的,而是辩证统一的。分解与协调问题既存在于系统的分析规划阶段,也存在于系统的运行控制管理阶段,这种思路与方法,既适合于处理工程系统问题,也适合于生态系统、生命系统和社会系统问题,而后者也越来越被人们所重视。

第二节 计划评审技术

一、网络分析

系统工程所分析和研究的对象当中,常常有一些组成元素很多,结构也十分复杂的系统。在系统的组成元素之间,存在着信息流、物质流或能量流。在分析这些流程图时,便会看出这是一种以组成元素为结点,其状如网的网络。当研究某个系统的结构和功能时,只有认真分析元素间的结合状态,才能更好地认识和了解系统的整体。网络分析方法就是以整个系统为分析研究对象,将全部工程合理地分解为若干部分,采用网络的形式,把各组成部分之间的错综复杂、相互依存、相互制约的实施和协作关系清楚地表达出来,反映整个工程的全貌,并能指明对全局有决定性影响的关键路线。

网络分析的理论概念和图论有关。运筹学、信息论、控制论都离不开图论的应用,特别在研究网络系统时,更离不开图论

的有关知识。在工程实践方面,本世纪初,泰勒的助手甘特曾用图解方法安排工厂里每台机器的工作和记录各台机器每天工作进展情况,这是一种安排生产和检查进度的手段,被工厂普遍采用,称为甘特图,亦称线条图,这是计划协调的统筹网络图的先驱。在线条图中,虽然可以从整体上反映各个工序的计划和进度,是一种加强管理的科学方法,然而,工序与工序之间的有机联系并未能反映出来,线条图未能表达出系统这个概念。但是由于这种方法有它的普遍效用,因而图表法后来仍有许多发展,并未被最“现代化”的方法所取代。

而反映系统中各元素相互作用和关系,反映系统的组成结构和功能关系的抽象化的网络系统图式却发展了多种类型。按网络的流量来划分,可分为物质流量的网络系统,信息流量的网络系统,能量流量的网络系统,时间、费用、距离为流量的网络系统,等等。以时间为流量的网络系统,最典型的是计划评审技术。

五十年代以后,反映系统复杂关系以网络图式为特征的计划评审技术得到了很大的发展,这里介绍下面二种计划评审技术。

二、计划协调技术(PERT)

这是现代计划管理常采用的工作流程网络的图示形式。1957年,美国海军着手研制一种由核潜艇在水下发射的导弹系统,称为北极星计划。承受该任务的包括8个总包公司,250个二包公司和将近9000个三包公司,加上一些研究单位和大学共一万一千余个单位。为了完成这项任务,主管人雷伯恩海军上将倡导了一项专门研究,来确定是否能够设计出一种新的用于

研制工作的计划与鉴定方法,以应用于北极星计划。经过一年,取得的 PERT 研究成果立即付诸施用,将北极星计划分解为约包括 3000 项工作的 23 个网络,获得很大成功。据评价,北极星计划能提前二年多完成,应归功于 PERT 对这项计划的协调,PERT 被誉为经营管理科学的决定性跃进。

PERT 应用的步骤大致是:首先按照整个工程方案从开始到完成,进行目标与事件的分解,画出 PERT 网络图(或称计划流程图)。第二,估计网络中每一道工序所需的时间,图中圆圈代表事件,事件是指在规定时间出现的,有助于实现计划最终目标的一个具体的完成事项或工序。事件之间的箭头表示活动,活动是指从一个事件过渡到下一事件所必须的工作时间。活动需要时间在箭头线旁表示。对每个事件用三个时间标志: T_E 表示估计事件最早发生时间, T_L 表示容许事件最迟发生时间, $S = T_L - T_E$,即事件容许推迟的最大时间。第三,将 $S = 0$ 的各事件或工序,用双线连结,这条线即为“关键线”或称主要矛盾线,也即时间最紧的工序线。然后按照主要矛盾线来安排人力、物力、财力,进行协调解决,抓紧完成主要矛盾线上的任务,这就有利于整个计划的提前或按期完成。见图 8.6。PERT 网络图对于分析计划进度是非常有用的。它在监督工作进程和检查执行情况方面,从进度角度确定关键性项目以作出人力、物力、财力的总体计划调整方面都是极重要的手段,可以说,这是对计划进度精确预测和实施控制管理行之有效的方法。

为了加速整个工程的进度,更合理安排人力和设备,都可以利用 PERT 的分析结果进行调整,将初步设计的各条线路作比较,抽调时间富裕线路上的人力、设备去支援关键线路,达到整

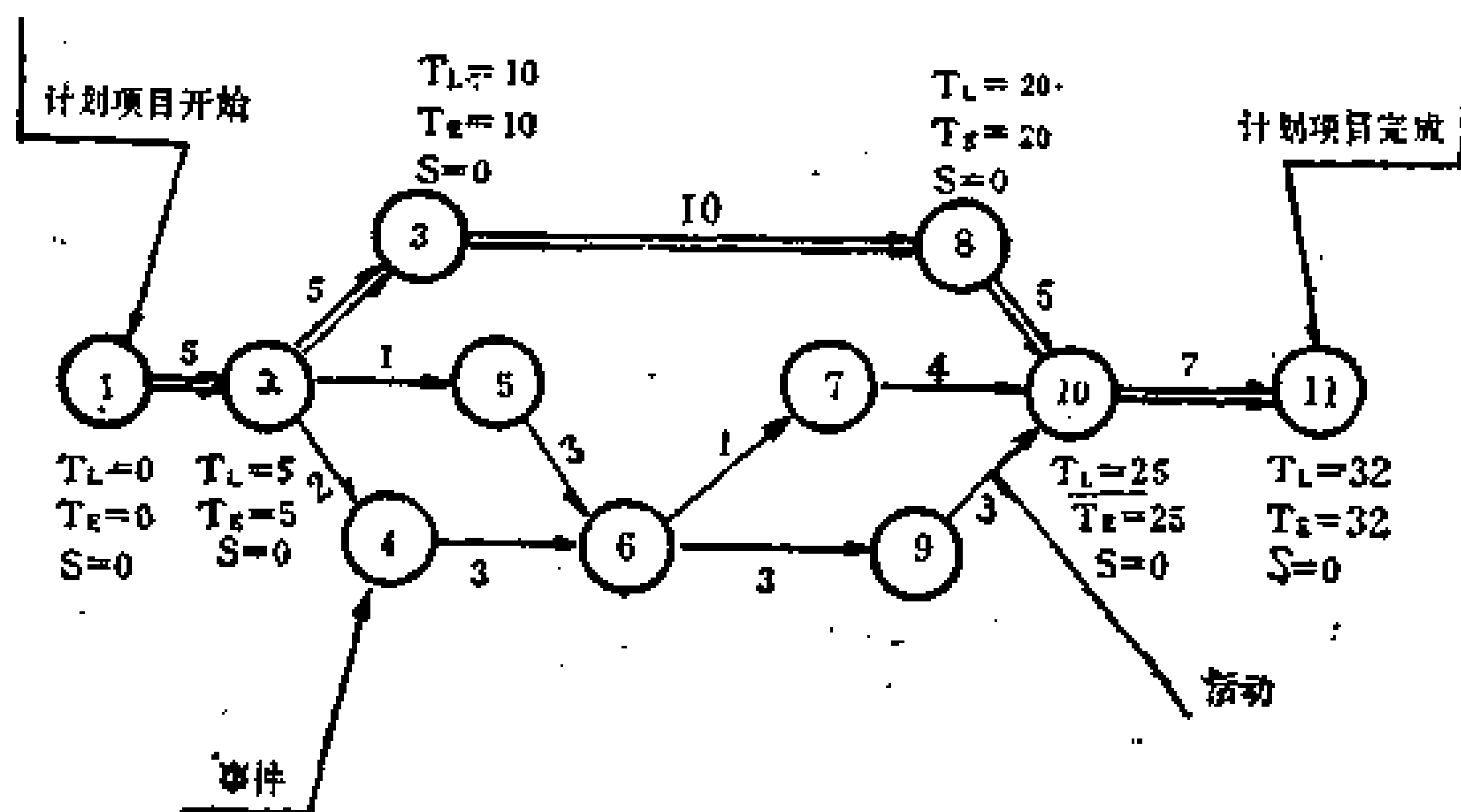


图 8.6 PERT 简略网络图

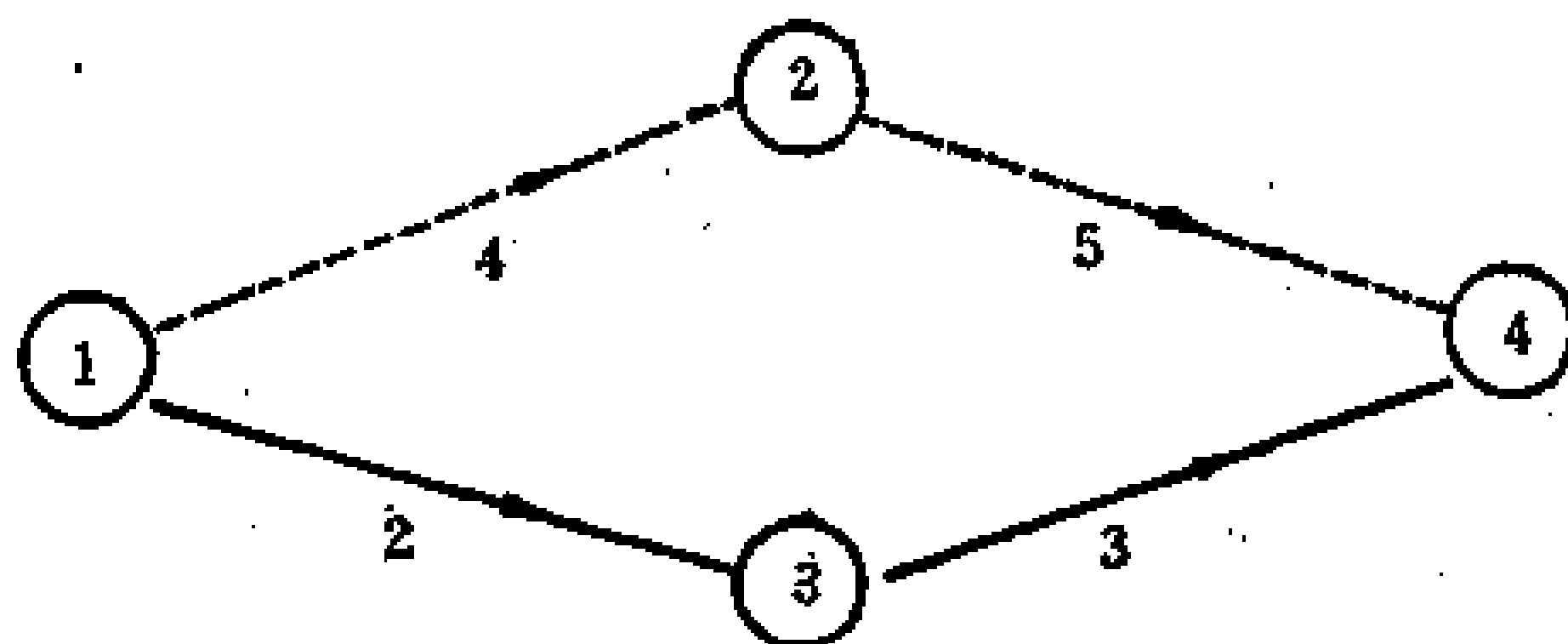


图 8.7

体上缩短进程的有效目的。以图 8.7 为例：

网络图中有①→④四个事件和四项活动。完成每项活动的时间以月为单位计算。由图可知，关键成路①—②—④组成的线路，共需九个月，而①—③—④线路仅需五个月。如果通过分析，对初步设计和安排进行调整和重新分配，从①—③—④线路上抽调出部分富裕的人力、设备等分配给①—②—④线路，那么在理论上两条线路可以实现同步，即①—②—④关键线路可以缩短两个月时间。对于一个复杂的网络系统来说，这种协调技术的应用就会带来更明显的效果，达到整个工程进度的提前完成。

三、随机型计划协调技术(GERT)

为了处理随机型多终端工程的协调问题，六十年代美国在制定阿波罗登月计划时，发展了 GERT 随机型计划协调技术。

由上面 PERT 方法应用过程可以看出，“确定性”是处理问题的突出特点。每一节点(即事件)的分析(活动)不允许有回路，只能全部完成，网络中所有节点和分析均需在最最终节点之前完成，所有节点都代表能够完成的事件。但在实际工程系统中，由于类型和初始条件的不同，存在着多种不同逻辑类别的事件和活动。如以建造一幢大楼，一艘轮船为终端产品的工程项目，与生产电冰箱、电视机为终端产品的工程项目所遇到的时间流程，物质流程就不尽一致。前者必须确保合格，后者有更多“随机性”问题要解决处理。因此 GERT 方法正是为了克服 PERT 的缺点保留其优点而发明的。它是把网络技术与概率论、模拟技术相结合的新成果。以普通工厂的零件生产为例，存在着合格率、废品率、返修率等多种情况，其 GERT 网络图如图 8.8 所示：

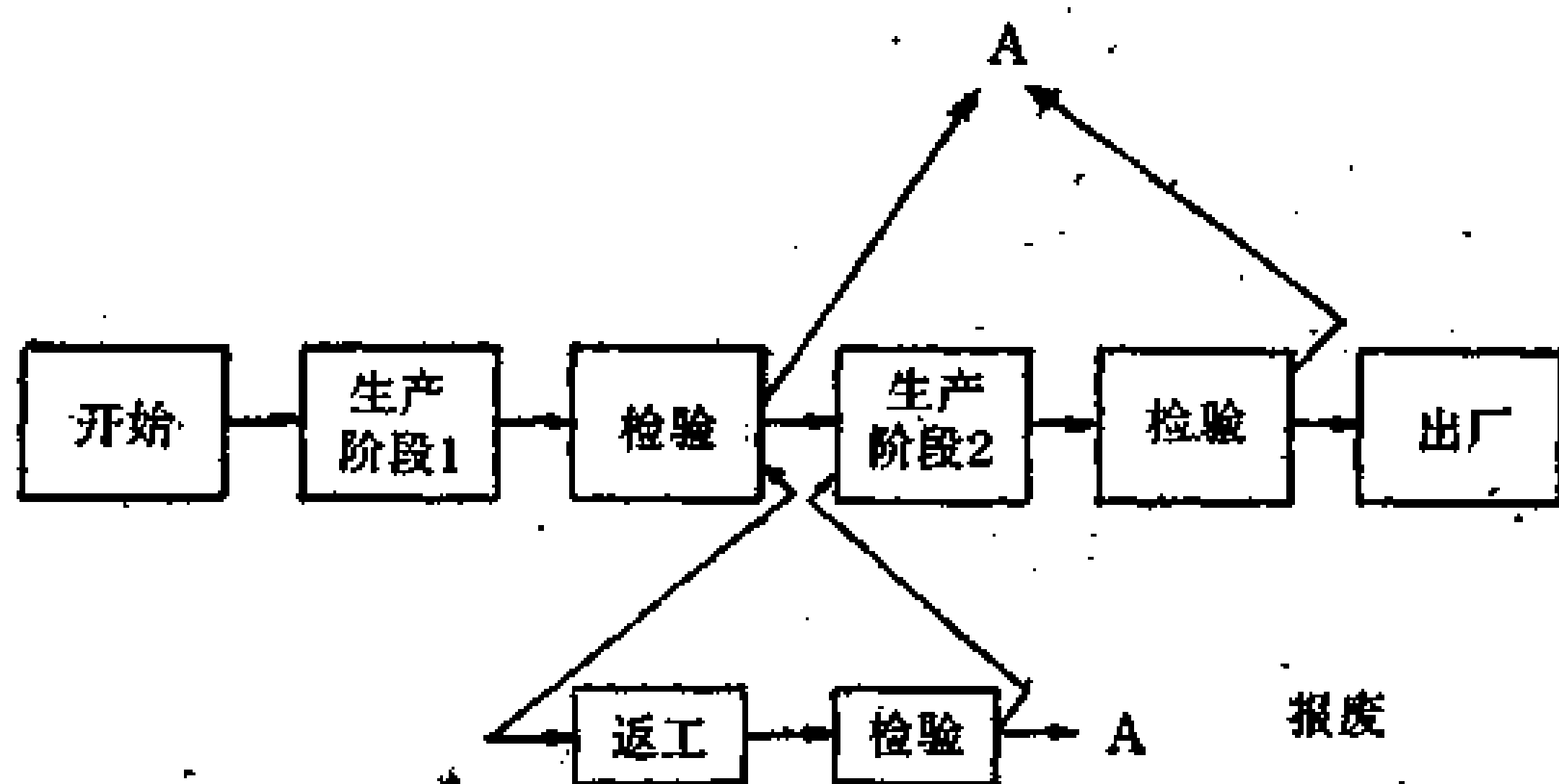


图 8.8 GERT 简略网络图

框图表明,零件生产过程要经过两个阶段,第一个阶段加工完毕后有一道检验工序,根据检验结果,零件或者报废或送往第二阶段,或者返工,第二阶段加工后,经过检验,或者报废转入废品库④或者出厂。GERT 网络系统中允许有回路存在,每个节点和分支的事件和活动允许有实现的概率,便于分析随机类型的工程系统。而对于复杂系统来说,这类网络模型可以作为一个子系统的组成部分,是某一个过程的网络化,所以能够更适用于描述“多级”随机型多终端结构系统。

到目前为止,应用网络系统对计划流程进行分解协调的方法,除 PERT 和 GERT 外,还出现了如最大流量问题和最短路径问题分析法,人力分配法,最低成本和估算计划法等等多种网络系统分解协调技术,其实质都是把复杂系统的计划流程用网络形式清晰地展现出来,从而易于协调控制人力、物力和财力,实现系统的最优化目标。

第三节 系统的设计

现代系统工程面对的是多输入、多输出并具有一系列功能目标的大型复杂的系统。因此,系统设计必须充分地获取、分析和利用信息,加强对系统的辨识,对信息资料进行整理综合,在对系统各个基本部分及其相互关系有深刻认识的基础上,进行实现目标的总体设计。总体设计是高一级的有着战略意义的创造型工作,有了总体设计,才能进一步利用获得的一切信息,利用各种技术手段,组织力量进行技术设计,使总体设计模型化、条理化、定量化。

一、系统的辨识

所谓系统的辨识,这是指为了确定所设计系统的性能,必须建立关于系统的动态方程。因此根据初步的试验(一次或多次)的输入、输出数据和与动态系统结构的某些试验前的知识结合起来,对系统各个部分建立动态系统数学模型,这就是系统的辨识。具体地说,还要弄清辨识目的、方法和要求。第一,由于辨识的目的性不同,模型也可以有不同的形式。为了物理学、生物学、经济学的目的可能建立一些解释性模型;对开环控制的预测,要求建立高精度模型;对闭环控制的预测模型则允许有较大的容差。第二,建立模型既可以根据物理定律的分析导出动态系统方程,也可以运用黑箱方法,根据代表各部分特性的试验测量数据进行试验辨识或是把物理方法和黑箱方法结合使用以建立模型。第三,在对初始模型通过物理定律分析或根据测量数据进行鉴定的基础上,进行模型修改,使其能包括由加工容差、老化和环境条件变化所造成的任何统计变化。只有当具有足够的数学描述可用来进行系统性能分析时,才能认为系统的组成部分已被恰当地辨识,这时才能认为基本达到了辨识的要求。

在系统正式运行之前的辨识与运行过程的辨识是有一定区别的。运行前的辨识,即是为了对未来系统一个过程进行动态特性的辨识,必须进行预先的性能分析,因而要在系统研制或建立之前做大量的数据测量。运行前的辨识又分为开环系统的辨识和闭环系统的辨识。开环系统的辨识如图 8.9 所示,这是在整个系统建立之前进行开环系统辨识,其目的,是根据特定的输入和

得到的输出测量值以求出开环系统过程 G 的转移特性。闭环系统的辨识如图 8.10;



图 8.9

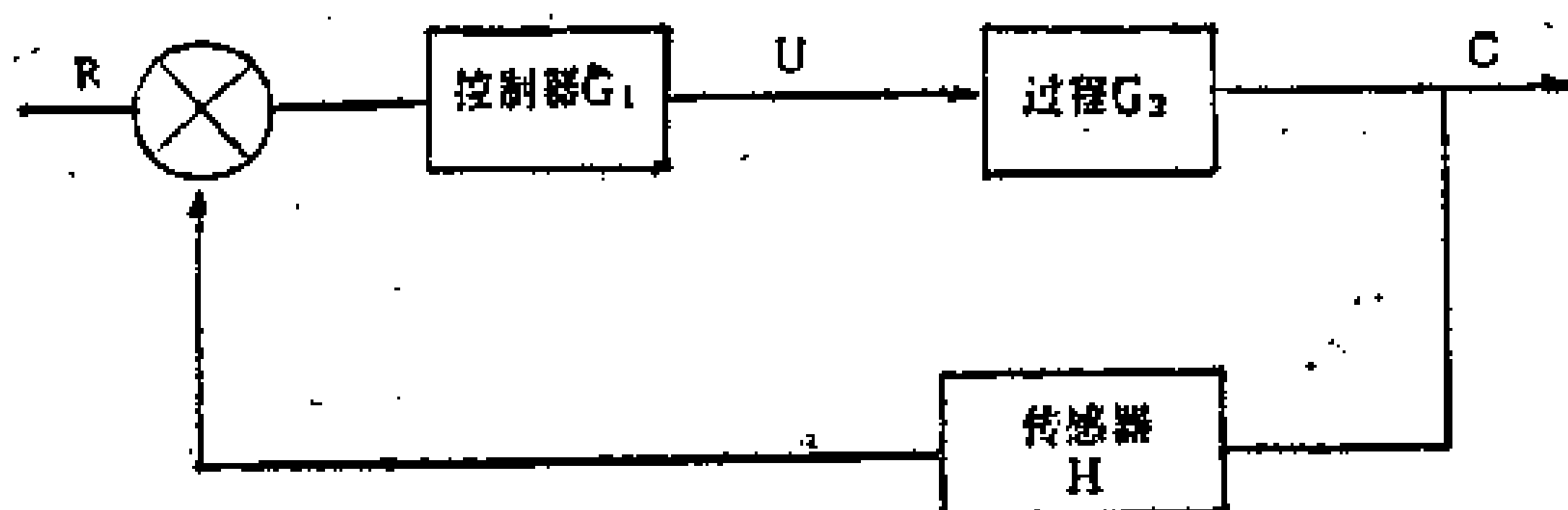


图 8.10

闭环系统辨识的目的是为了设计具有适当性能的闭环系统，这就要求知道过程 G_2 的确切特性，而根据 U 和 C 的测量值，就能够从每对激励信号和输出信号之间的变化确定 G_2 ，以准确反映输入和输出的动态关系。上述这种在整个系统建立之前的过程辨识就带有预测的意义。

在系统建立之后所涉及的是运行期间的辨识，这是属于“自适应系统”的问题。这类系统通常是有一部分设备自动地测量过程的动态变化，而同时有另一部分设备则通过对前者的测量结果与某个最优品质因数进行比较并自动地对控制器的特性进行调节。它的辨识有如图 8.11 所示：在系统运行期间，“识别器”单元连续地测量过程的转移特性，它所得到的信息与输入信号的分析信息一起送入决策计算机。决策计算机根据系统必须达到的某个性能标准，决定控制器所应具备的特性。假若这个

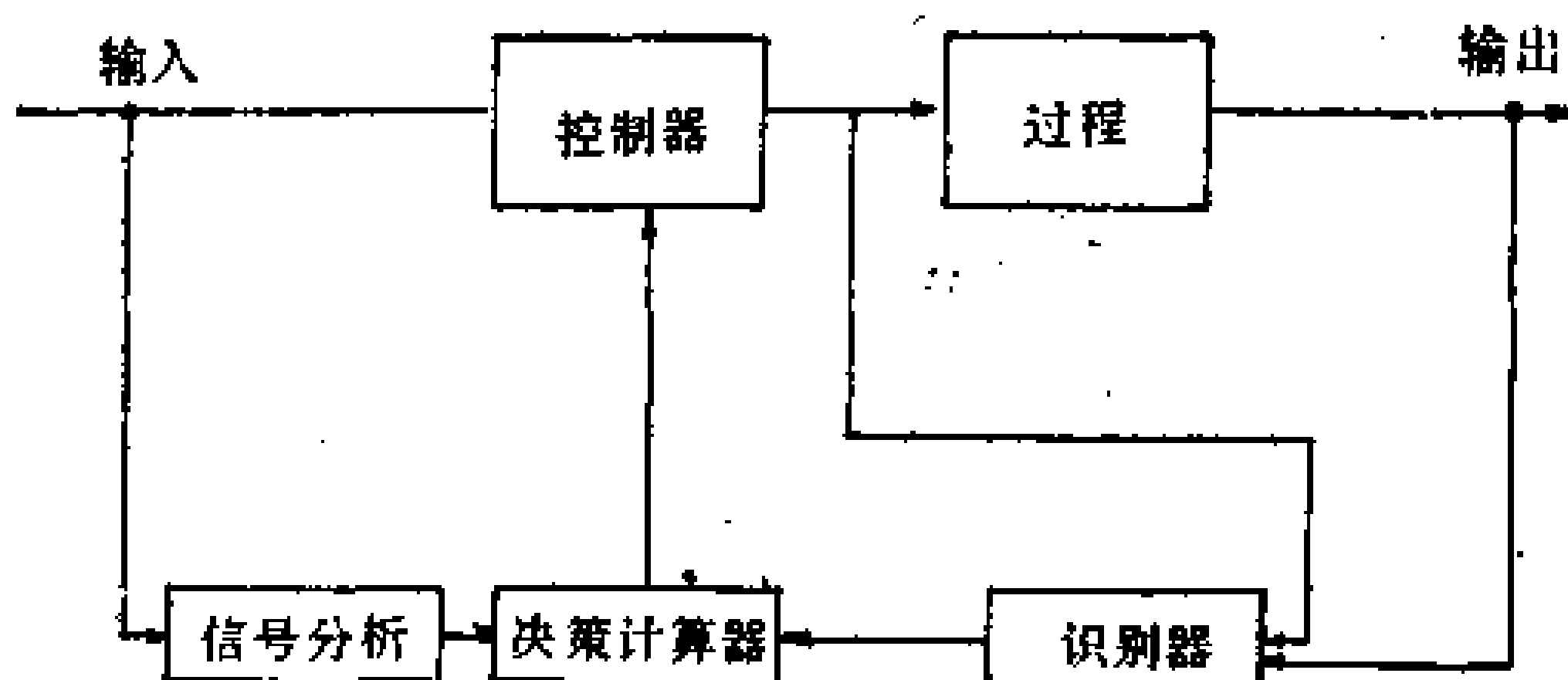


图 8.11

过程能用一个线性的、定常的装置来代表，则辨识问题就可以很容易地解决。但如果这个装置的动态特性是非线性的或时变的，则辨识问题就非常困难了。这时可能的解决办法是借助有设备转移特性形式的某些先验信息考察其中一些重要项，对过程特性只能作近似或简化的描述。

二、系统的综合

通过系统辨识建立动态系统的数学模型，完成了达到功能目标的方案。但按系统的总目标和总任务，运用各种建模方法是可以形成一组备选方案的，这些方案必须都是可行的，即技术上能够达到，资源和设备能力均有保证等。每一个方案所选的结构和参数应非常明确。如为了满足能源需要，可以考虑选择石油、煤、核能、太阳能、地热能、沼气能等，其中有的能源如煤，既可作为直接燃料，也可以气化再燃烧，还可以用于发电转为电能，但不管哪一种，都要决定它的开发量及需要转换的数量等，这些参数应非常明确。所以，为了一个新的功能系统，从总目标、总任务出发形成一组均可行的备选方案，这就是系统综合；

再对备选模型方案进行功能效益比较、评价、选择，这就是系统分析。

分析与综合，就本意来说，这是一对哲学范畴，也是逻辑学范畴。分析是把对象整体分解为部分进行研究的方法；综合则是在分析基础之上，把部分联结为整体的方法。哲学方法的分析与综合是不可分割的对立关系，但就一些传统的哲学观点来说，强调分析在先，综合继之，分析成为逻辑起点，这也是传统科学的研究方法。正如贝塔朗非说的，“古典科学在其各门学科中，如化学、生物学、心理学或社会科学各门学科，都力求分离出被考察的宇宙的要素（化合物和酶、细胞、感觉、自由竞争中的个人等等），希望随后在观念上或实验上把它们重新结合起来时，就会形成一个整体或系统（细胞、理智、社会），并易于理解。”^①这是指的传统的分析与综合。贝塔朗非认为系统科学则不同，这是“一类全新的对象进入科学思维的范围”。他在《一般系统论的基础、发展和应用》第二章中指出：在现代各种自然科学与社会科学中，具有一个普遍的趋势，即趋向于综合。他认为“一般系统理论中，综合是中心思想”。这里的综合，是指整体观念，他的全新对象的科学思维是指整体思维。这样，系统科学的研究方法，就是从整体出发，也就是说，综合成为逻辑的起点。比如，从整体目标出发，再继而研究系统各个组成部分及其相互关系，或是对达到整体目标的各个方案的分析。其逻辑程序不是“分析—综合”，而成为“综合—分析—综合”。第一个综合，就是研究对象

① 贝塔朗非：《普通系统论的历史和现状》，《科学学译文集》，科学出版社1981年版，第313—314页。

系统的整体目标、总任务、总功能；系统分析，已不是以往孤立、片面、静止的观察方法，而是建立在综合前提下，坚持开放的、动态、发展观点的分析；最后的综合，已体现了系统的整体，要素与环境的辩证统一。

在这里必须指出，系统科学从综合开始的思想方法是与辩证逻辑的思想方法完全一致的。恩格斯早在《反杜林论》中就已指出：“思维，如果它不做蠢事的话，只能把这样一种意识的要素综合为一个统一体，在这种意识的要素或它们的现实原型中，这个统一体以前就已经存在了。如果我把鞋刷子综合在哺乳动物的统一体中，那它就决不会因此就长出乳腺来”。^①恩格斯特别把“以前”和“存在”四个字加了着重号，可见逻辑起点表述得多么明确，在辩证逻辑那里，综合是与分析不可分割的，而且它又是逻辑的起点，只有形而上学的认识方法把分析与综合割裂开来，并把分析作为逻辑起点。

系统科学的贡献，正在于明确地强调从动态的、开放的、整体的综合出发去认识系统世界，把传统科学研究从分析开始的逻辑关系颠倒过来，体现并发展了辩证逻辑的正确观念。正如耗散结构理论的创始人普利高津指出的。“我们正是站在一个新的综合、新的自然观念的起点上”。^②

系统科学的分析，也就是通常称之为系统分析，是以模型作为基本的工具。系统分析是对各个备选方案进行比较、评价，而且是通过模型来完成这种比较。如果按备选方案制造出几个系

① 《马克思恩格斯选集》第3卷，人民出版社1972年版，第81页。

② 湛垦华、沈小峰等编：《普利高津与耗散结构理论》，陕西科学技术出版社1982年版。

统来作实际比较,不仅费时费力,而且在某些场合还不可能制造出来。通过模型比较来估计各备选方案可能达到的功能,则是经济可行的。现代系统分析更是借助计算机来进行这种分析、择优。所以关于系统的分析,可以归结为这样几点:第一,它是在综合基础上对各模型进行比较;第二,这种比较是关于设计对象各部分的属性、特点、关系的比较,涉及设计对象的功能分析,可行性分析,现实性分析,以及主导性部分分析,共性与个性的分析与比较;第三,往往选择的理想方案不是完全符合现实的,因而对被选模型方案还要根据实际情况作某些修正,并通过集思广益完善它。经过系统评价和决策,如符合系统目标要求,才能将方案转入实际系统设计新阶段。作为系统论中心思想的综合,在系统设计过程中也仍然贯串始终。

三、系统设计

通过系统分析阶段,已充分地获得了各种方案的信息,提供满足预期目标和任务的系统技术设计依据。系统设计就其基本内容来说,可以概括为几个主要方面,即确定设计的方针,依据系统设计方法模式对系统的内外关系和层次关系进行分解合成;确定各子系统的目的和功能及相互关系;决定对于系统的管理体制和控制方式;对子系统及整体系统进行技术设计和评价等。下面仅着重论述其中几个问题。

1. 系统设计的观点和思路。首先,必须确定系统设计的方针和总的观点。现代系统设计就基本方针和要求来说,是期望产生一个有投资效果的系统,使生产部门与用户之间的全部目标都能得到满足的系统。这包括工程系统整体的可靠运行,附

属设备,支持系统运行的维护系统,后勤系统,提供管理和运行技巧的人力系统,支持系统运行的财务控制及管理系统等都能给予保证。

系统设计的基本思路是围绕着期望产生一个保证达到上述系统总目标的系统技术规格的思考过程,而这种技术规格是在预测整个系统生命期性能基础上选出的,并且意味着性能设计、可靠性、维护和后勤设计等辅助过程已经注意结合在整个设计概念之中。

一个重大的系统工程项目的的设计者必须注意抓好重点。重大工程往往要几百个单位的共同协作,成千上万人数年的工作量和亿万投资费用,对这种设计必须有对未来可能出现的各种不良情况甚至灾难的科学预测,提出防护措施和应变的准备,并必须密切设计与施工或制造单位与用户的联系,甚至要制定好在系统移交给用户之后适应运行环境的详细计划。而从初步概念一直到整个系统设计获得批准的过程,系统设计者都应当始终把注意力放在所碰到的主要问题和主攻任务上,特别要重点放在由巨大投资的设计所产生的管理控制问题上。

2. 系统设计的方法。系统设计的方法不能片面理解为局限于巨大的技术项目或工业联合体这种概念上。一个优秀的系统设计实践的指导方法,既体现在巨大复杂的系统整体设计上,也应用于系统的各个组成部分以至任何一个“人-机”组织的设计中,即是从分析、选定总体技术战略直到设计具体的各个技术系统;既应用于系统内部结构设计,也应用于协调系统整体与环境关系的设计。

一个系统设计,也是提供一个方法论的结构框架,可以应用

到各个范围中去,并划分为系统设计的递阶等级,如果从系统设计的工艺策略的分析和选择角度来划分,则系统设计各层次可以如图 8.12 所示的递阶分级。

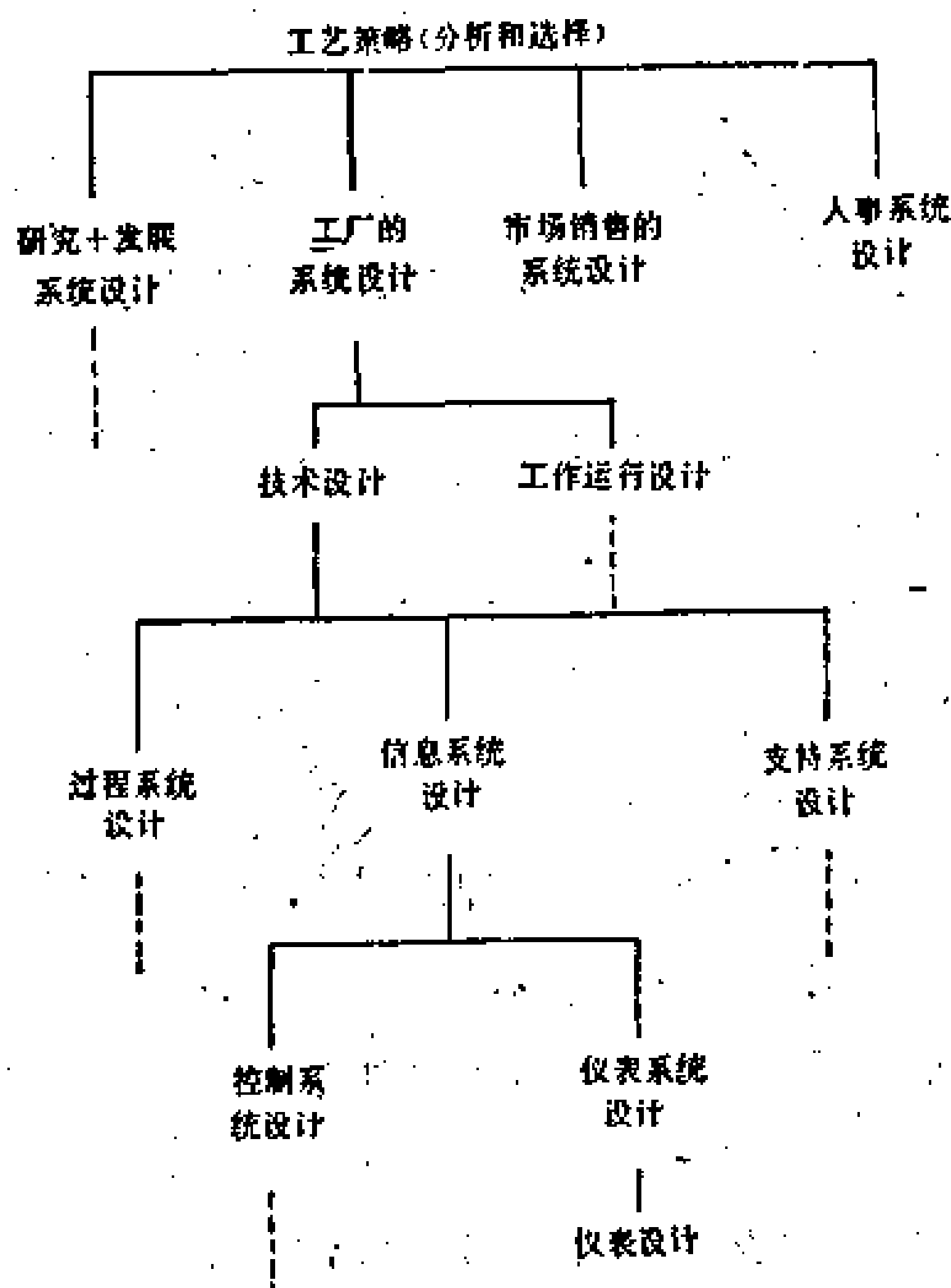


图 8-12 系统设计层次递阶图

系统设计的方法论是建立在上述系统分析的基础上的,有了对系统的后果分析、危险分析、效果分析、性能分析等的准备,才能有好的设计的可能。而系统设计方法的着眼点应是整个系统和全部生命期,并应顾及系统与环境的关系。

上面介绍的系统设计层次的分解例图是从工艺策略说的,

这是对系统进行分解工作,对所分解的子系统逐个设计和评价,目的是便于设计,便于分析各个部分的相互作用和关系,但最终还必须合成为一个整体。合成过程又必须解决好各子系统之间的“接口”设计,以及子系统的管理和控制方式以利于系统的合成。

但一个系统的运行,不仅要求有内部系统即系统本身的设计,还要处理好在环境中运行的问题。因此,除内部设计外,还必须要有外部系统即包围系统的环境和社会设计,研究与所设计的对象系统运行有关的各种内外相互支援和相互干扰、制约的辩证关系。外部系统对内部系统的支援、制约关系称为“输入”,如社会对系统设计在功能上、费用上、物资上、能耗上、安全上、环保上、体积大小上、工期上等等的要求和制约条件,这是外部环境系统对内部系统设计的要求和限制。而内部系统设计同样对环境系统有干扰和影响,这种内部系统对外部系统的干扰与影响统称之为“输出”,如一个新系统的建立,对社会带来新的福利、新的产品、新的信息或新的污染和损害等等,以及新系统与同类系统是否存在兼容关系等。这时又要根据“输出”效果分析调整修改内部系统设计和外部系统设计。把内部设计与外部设计结合起来,是设计过程的系统综合。

科学的系统设计方法要求从实际出发,具体问题具体分析,不能千篇一律。对于已经成熟的常规设计的综合,可以是根据总目标和总任务的要求,应用过去所得到的成果,把已有经验的设计部件按适当比例综合成一个新系统。如常规火电站的设计,尽管电站的规模和容量不同,但是除高温高压再热循环的特殊系统外,一般高温高压或中温中压电站在设计上并无严格的质

的区别，在结构与功能上是相似的，功能间的逻辑关系也是一开始就明确的，这种系统设计基本属于常规性设计，在开始时不需要进行功能设计而可直接涉及细节的设计。对于创新的工程 and 工序的设计则是属于一种创造性设计，此时应先采用功能综合和功能分析的方法，先研究、分析输入与输出的期望值，确定边界条件(环境)，并列出一系列必需满足的功能，把这些功能按照逻辑关系和时间顺序综合为系统模型，再分析模型的现实性、可行性，求取最佳结果，这是系统工程的综合设计方法。综合设计的原则之一是先制定理想方案，再根据实际情况进行修正，当然对成熟的常规性系统设计不必采取这种功能设计方法。

3. 系统设计的步骤。系统设计是继系统分析之后紧接着进行的，经过大致十二个步骤之后，就进入系统综合评价。可以用图 8·13 来说明。

系统分析阶段是根据系统总任务和总目标选择最好的候

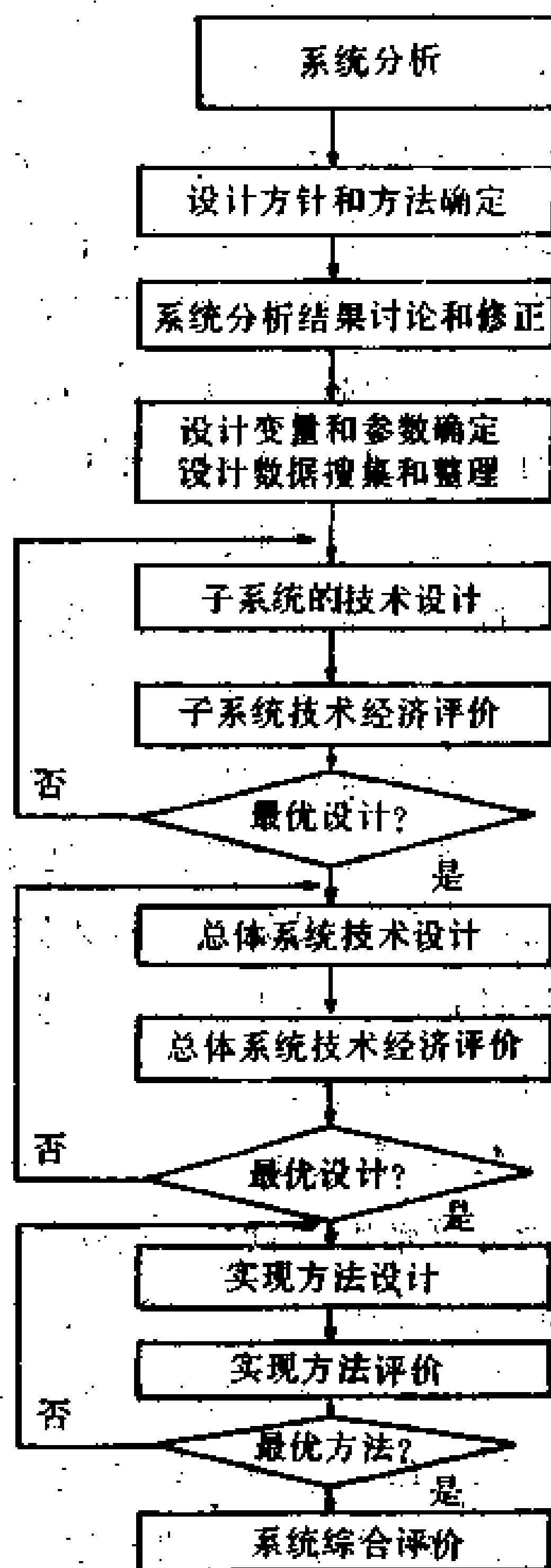


图 8·13 系统设计步骤图示

选方案。通常针对技术目标用来对候选方案进行优选和评价的基本准则是“成本—效能”准则。效能是一个特征指标，它表征一个系统(工作系统和支持系统)在给定的工作和生命周内，在给定的工作要求和环境情况下满足规定工作要求的总的有效能力。它的通常指标是可用性、稳妥性和能力。“成本—效能”设计意味着在效能和生命周内与成本之间寻求一个最好的折衷，这个折衷是通过协调工作系统的功能性能设计(PD)，可靠性设计(RD)，维护设计(MD)，和后勤设计(LD)中一些附属折衷来实现的。这些附属的折衷意味着上述每一个设计过程中通过设计回环在局部指标和达到这些指标所需的代价之间得到一个准优的平衡。然后，这些指标结合成整个系统的效能和生命周期成本的模型。在总的“成本—效能”设计中，一个突出问题是存在于各设计回路之间的耦合，即使性能、可靠性、维护和后勤等设计能单独地实现局部最优，但这并不意味着整个系统的总体“成本—效能”一定最优。因此必须根据设计过程中结合的程度增设某些结构来防止由于回路和耦合的增加而造成的设计过程出现不稳定的危险，从而才能获得改善的“成本—效能”设计的目的。

4. 计算机在系统设计中的作用。利用计算机进行系统设计称为计算辅助设计(Computer Aided Design)，这个名称来自1960年开始的美国麻省理工学院的CAD计划而得名。CAD把人的创造能力和计算机的解析能力或计算能力互为补充，并经济地结合融为一体。这是一种采用分时(TSS)计算机和图形输入/输出装置的、由人进行设计的系统。所谓“计算机辅助”，这是一种富于哲理意义的表述，它意味着扩大或增加人的能力。本世

纪来,由于生产朝着精密、高效、自动化的方向发展,以人的器官来协调控制机器生产已愈来愈不相适应,因而最初人们创造了一些能够精确测量各种物理量或获得机器生产过程各种信息的感受器和执行机构。五十年代出现了一些模拟式自动控制设备,实现单变量自动控制问题。计算机快速运算能力又提供了解决复杂多变量生产过程调节控制的运算工具。但不可想象的是有一套计算机协调控制的生产自动化控制系统,而相配合的却仍然是信息反馈迟缓的人工报表式管理系统。从六十年代开始,又进入了计算机协调控制的系统化管理时期,而计算机运用于辅助设计,又代替了部分人类的脑力劳动,更是一项极重要的新创举。正如马克思指出的,“劳动资料不仅是人类劳动力发展的测量器,而且是劳动借以进行的社会关系的指示器”。^①现代电子计算机不仅应用于生产控制,协调管理,又应用于辅助设计,这是当代生产和科学技术发展具有决定意义的一个特征。所以CAD计划应用的成功,这是工程技术设计的一项重大突破,是人类开始进入智力解放新时代的又一标志。现在除计算机辅助设计外,有计算机辅助制造,计算机辅助规划,计算机辅助教学等一系列计算机参与的“人一机”新系统出现。

CAD的应用有两种情况,一种是应用于综合系统设计上,另一种是应用于单独系统设计上。

CAD应用于综合系统设计方面。综合设计有两种含义,第一种是指多领域设计,另一种是从概念开发、设计、制造和运用整个过程各个阶段的时序设计。美国自发明CAD以后,已出现

① 《马克思恩格斯全集》,第23卷,第204页。

了许多典型的计算机辅助设计系统。如 ASAP 是美国 LTV 航空宇宙公司用于设计飞机的综合分析程序。COMRADE 是1965年来美国海军舰艇技术中心用于设计和建造舰艇的计算机辅助设计计划。ELECSYS 是麻省理工学院开发的综合土木工程设计系统扩展成的综合电子工程设计系统。ICADS 则是密苏里大学开发的综合辅助作用的计算机辅助设计系统。IPAD 则是美国航天局以人和计算机联合为中心,把人和计算机的最佳组合的设计过程自动化作为目的的计算机辅助设计程序,也是现代宇航运载工具设计用的综合程序。

CAD 应用于单独系统设计方面。CAD 用于系统设计方面不是从概念到制造整个过程的一揽子设计,而是围绕着一一定系统设计目标用的计算机辅助设计系统。如 BRITSHIP 是英国造船研究协会为了船舶的综合研究和生产目的而研制的计算机设计系统。CADSYS 是麻省理工学院开发的设计系统,它的目的不是使计算机从图解起到要素的作用的综合设计,而是使设计者对发现适合于性能目标的独立的设计参数,进行有组织的探讨。其结构简图如图 8·14 所示。

下面 CADSYS 系统结构示意图中相互作用的计算机系统,包含着与设计参数、性能标准有关的独立问题的指令翻译和从属问题的分析与陈述。

CAD 应用于系统设计现在已在多方面发挥了作用,如为应用于控制系统的测定和设计,应用于环境设计和分析,应用于制造系统设计工程,应用于建筑设计的评定以至应用于评价和实验月球的模型设计等等。

以系统的内部设计与外部设计时应用计算机进行设计的顺

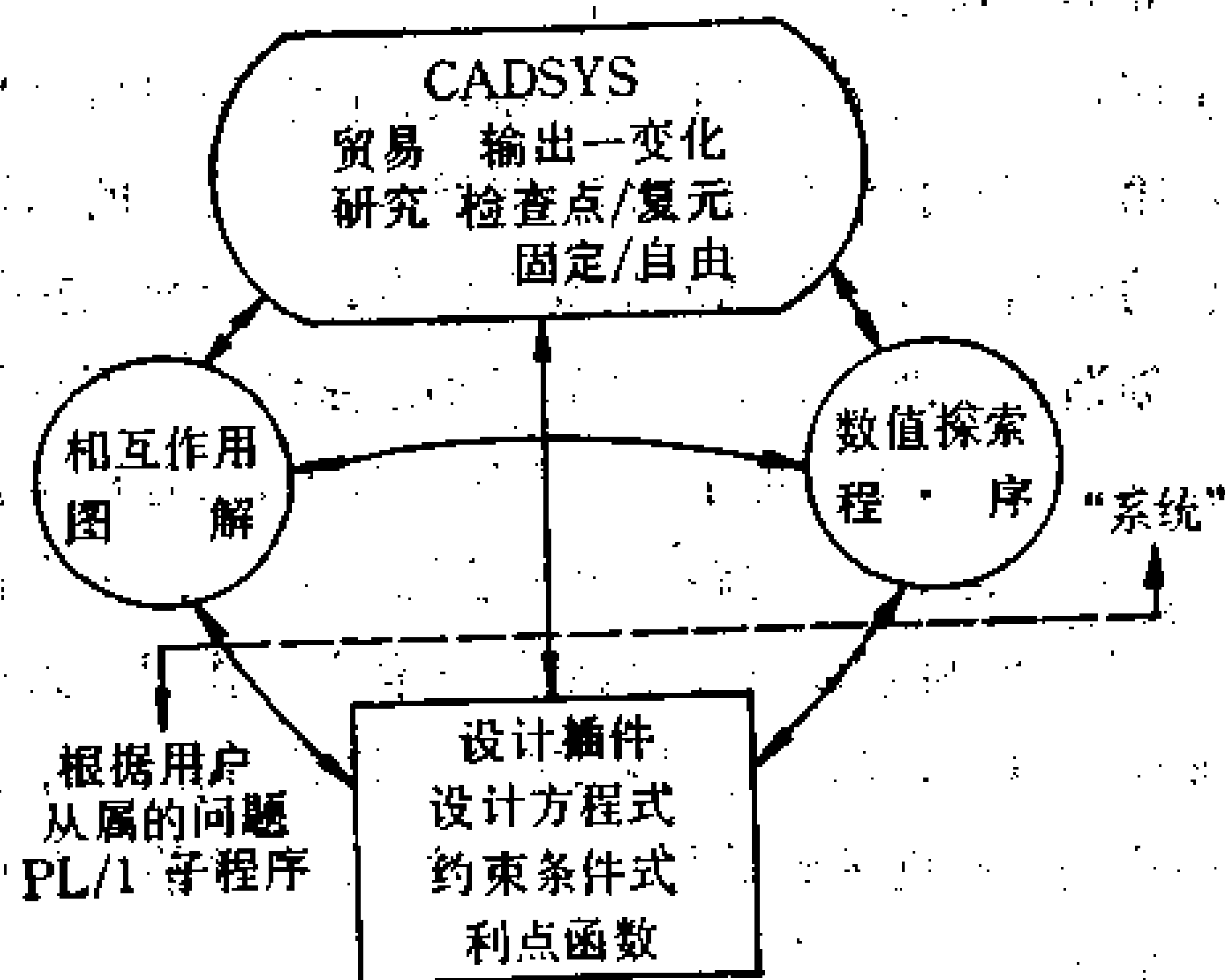


图 8·14 CADSYS 的系统结构简图

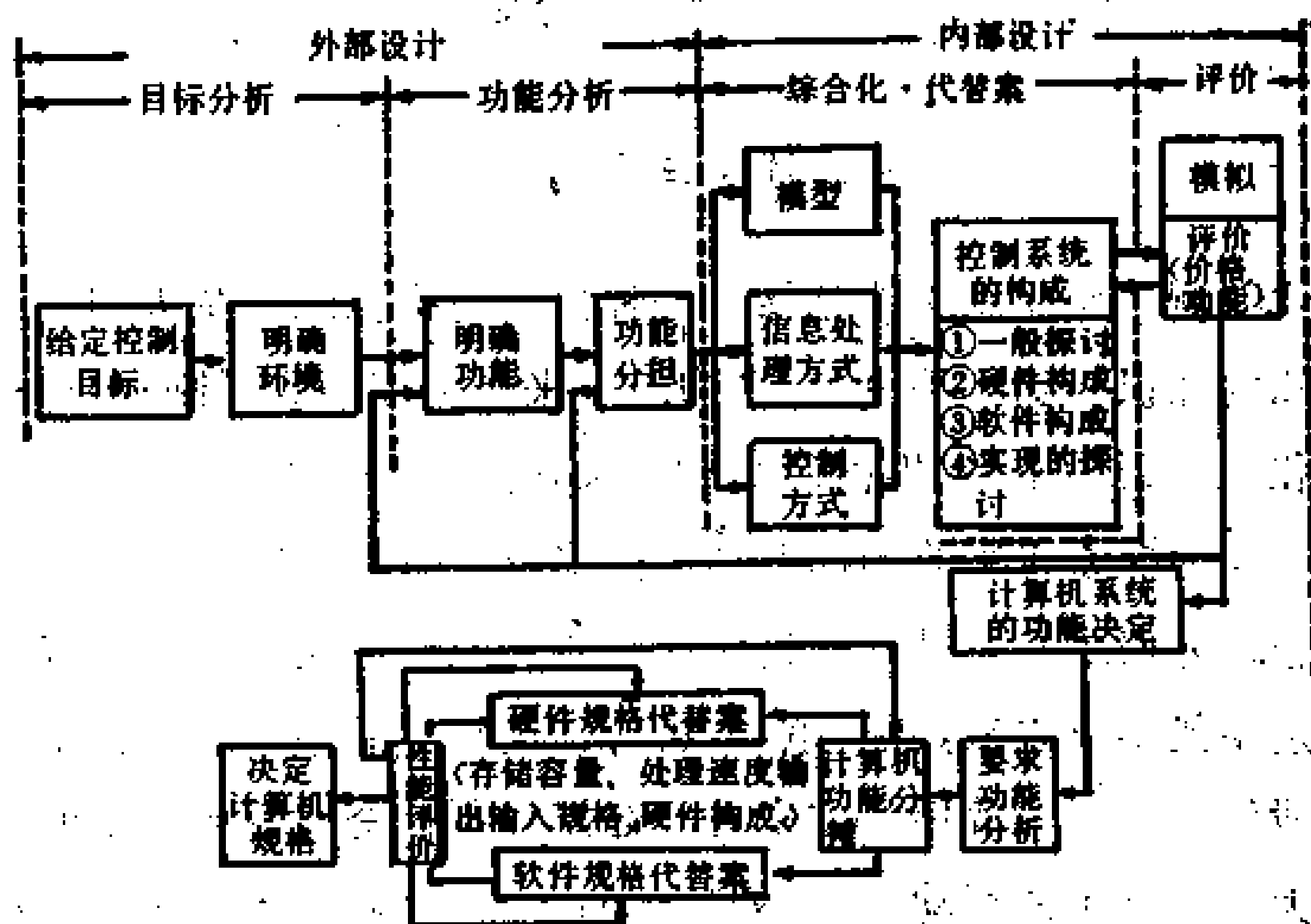


图 8·15 利用计算机进行系统设计的顺序图例

序及其所起的作用如图 8·15 所示。

综上所述，利用计算机进行系统设计的作用可以概括为以下几点：第一，利用计算机辅助系统设计，这是把人的创造能力与计算机的分析及计算机功能的高度结合，是解放人类脑力劳动的一个创造性发展。第二，计算机辅助系统设计不仅用于单项系统目标的设计，也应用于综合系统设计上，随着科学技术的发展和经验的积累，应用的路子愈来愈宽。第三，人类有自觉的能动性，人在计算机辅助设计中，始终起着主导作用，人借助于计算机系统实现自己的设计目标，而计算机只“辅助”，不能完全代替人的作用。但随着计算机应用的发展，一个崭新的创造时代将伴随而来。

第四节 预 测 技 术

一、预测与预测技术

预测，顾名思义就是指的一种预计与推测。它是人们利用已知的知识、经验、手段，对事物的未来作出推知或判断，根据过去和现在预计未来，根据已知推测未知。

作为探索未来的预测活动，由来已久，在蒙昧无知的原始社会，人们虽然盲目地受自然法则所支配，但是在社会实践中也期望能推测未来，通过龟甲、兽骨预测年成的好坏。从河南安阳殷墟出土的卜辞甲骨文来看，在奴隶制社会的商代时期的军国大事和君主的行动，都要经过巫的占卜，预测战争胜负，然后才作出决定。当时把专职行占卜、对国事决疑的人称为“贞人”，

他们的社会地位很高。中国古代的《易经》中的《序卦》、《说卦》、《卜卦》就是古代的“卜算之学”，其中“卜”就是预测，吉凶祸福“卜而知之”。《易经》对占卜的解释包含了当时人们对世界一般事物的最原始的哲学见解，从阴阳、万物交感的观点观察事物变化、发展推测未来。但是它是以宗教、迷信的形式反映出朴素的辩证法思想，并不能对未来作出真正的科学预测。以后随着人类对自然、社会发展的认识逐步深化，根据客观过程的过去和现在的进程去窥测未来，虽然也有许多预测成功的事例，但毕竟多半还是凭着个人的经验直觉和理性的判断。预测作为一门科学来进行研究，那还是本世纪的事。首先，由德国阿·费莱希泰姆教授在四十年代提出并使用，以后在欧美广为传播，逐渐成为人类认识自然和社会的一种手段，探索未来的有力工具。

现在，预测技术已被广泛地运用于研究军事、政治、外交、经济、文化教育、科技等领域，为正确的决策和规划提供可靠的依据。六十年代以来，各国建立了大量的预测咨询机构，到七十年代初世界各国已有 2500 家专业的预测咨询机构，美国的兰德公司、斯坦福国际咨询研究所、西德工业设备企业公司，人类 2000 年国际协会，世界未来学会以及国际应用系统分析研究所都是在国际上负有盛名的预测机构。世界各国，包括第三世界的国家都投入了大量的人力、经费于预测工作。对于预测的经济效益，美国曾作了一个统计，通过开展技术预测创造的新产品的盈利，相当于技术预测投资的 50 倍。近年来，预测工作在我国得到党和政府的极大重视，对我国国民经济发展，人口规划，科技发展的战略目标等进行长期、中期和短期的预测，并且取得了明显的效果。

预测活动也是人们的一种科学认识活动，但它又区别于一般的预见。科学预见，是基于绝对可信度的关于未来的非概率判断，如门捷列耶夫通过元素周期律，预见了当时未曾发现的元素的存在。而预测活动，则是对未来一个时期内，某一对象状态、过程的概率判断。

预测活动是由预测的主体——人和预测对象、目标、手段、预测结果等要素组成。预测过程一般可以分为四个阶段，首先是要研究预测对象的性质和状态，确定预测的目标，提出该预测对象的具体的指标要求。二是根据已经确定的目标，分析对预测对象的未来有重要影响的有关因素和条件，收集预测对象及有关因素的过去、现在的资料和数据，通过对原始资料的处理，从而获得预测信息。三是对预测对象的历史发展过程、趋势分析的基础上揭示出说明未来的演变规律，通过数学手段，建立预测模型。最后是对预测结果进行分析，形成预测方案。

由于预测是基于过去和现在的已知信息，但是过去和现在终究还不等于未来，因此用预测规律判断未来，肯定会出现超出误差范围的变化趋势，预测未来的时期越长，未来的影响因素越多，预测对象本身发展的成熟程度越低，误差也就会越大。预测工作应力求预测的结果接近于未来的真实情况，使预测误差限制在一定的误差范围内。提高预测精度，首先要求预测的信息可靠，占有预测对象及其相关因素的数据，包括历史数据，都要求准确。再就是按照不同的预测对象和预测目标，选择相应的方法，建立精确的预测模型。

二、定性预测方法

定性预测方法,它是利用专家的经验 and 判断能力,作出一些定性的预测结论或给出定量的估计值的方法,主要包括专家的个人判断、组织专家会议、特尔斐法和交叉影响法等。

专家个人判断法是通过征求专家个人意见,依靠专家个人的经验和知识对未来的事件作出某些推测。这种方法比较简单,可以最大限度地发挥专家个人的创造力,不受外界影响,没有心理上的压力,但仅凭专家个人的经验、知识总归是有局限性的,预测中难免会有片面性。而组织专家会议的方式,它是通过参加会议的各个方面的专家互相讨论,交换意见,调整各自的评价,依靠专家的集体的智慧进行预测,弥补了专家个人知识的局限。但这种方式的缺点是参加会议的专家容易屈服于权威和大多数的意见,受劝说性影响,也难以公开放弃或修正自己的观点。

美国兰德公司的达尔奇和赫尔梅于本世纪六十年代提出了专家评估的新方法——特尔斐法,最先用于技术的预测。特尔斐原是古希腊的一个城,城中有座阿波罗神殿,可以预卜未来,特尔斐成为预告未来的神谕之地,因此借用其名。特尔斐法的基本思想是重视专家的长期经验和丰富知识的巨大潜在记忆的集合形成的对未来事件的判断能力。但它不是采用专家会议的形式,而是采用函询调查,分别向与预测课题相关领域的专家提出问题,而后将他们回答的意见进行综合、整理、归纳,匿名反馈给有关专家,再次征求意见,经过几次往返,最后形成比较一致的意见。特尔斐法的特点:一是匿名性,在调查过程中不暴露专

家个人的名字,每人都可以充分地、客观地发表自己意见,受心理因素影响较小;二是带反馈的函询调查,每个参加应答的专家,可以从每次反馈回来的问题调查表上得知集体的主要意见,以及同意或反对的理由,可以据此作出新判断;三是采用统计方法对专家意见进行定量处理,找出专家意见的概率分布,根据专家的评分值和等级排队,计算出专家意见的集中程度和协调程度。这样就可以迅速而有效地把许多有经验专家的意见集中起来,对未来作出预测。因此,到了七十年代,特尔斐法被广泛地应用于技术、经济、社会发展的预测,特别是长期预测^①。

特尔斐法的实施程序,首先是确定预测目标,选定预测项目,设计调查表,然后根据预测问题,编制所需专家类型表,选聘不同领域的专家。一般说来,理想的专家其知识深度曲线,专业知识的峰值应为最高,而又要求与之相关的知识值也要有相应的高度;同时,预测的精度与参与预测的专家人数呈函数关系,随着人数的增加,精度也会相应提高,但是人数太多,不仅难以组织和协调,结果的数据处理比较复杂,而且人数达到一定阈值以后,再增加专家人数,对预测精度影响并不显著。虽然专家人数取决预测问题的性质和规模,但对于一般性的预测问题,根据统计资料,以10—15人为宜,(见图8·16)。专家一旦选定,就可以开始函询,把调查表分寄各位专家,专家按调查表的要求对问题和所列事件提出评价,组织者根据返回的调查表,对专家意见进行综合、归纳,作为下一轮的调查表再反馈分寄给每个专家,供他们重新研究后再次作出评价,并且充分陈述自己的理

^① 参见顾镜清:《未来学概论》,贵州人民出版社1984年版。

由。按经典的特尔斐法要求往返四次,经过四轮征询以后,专家意见可以收敛到相当一致的程度(见图 8·17)。

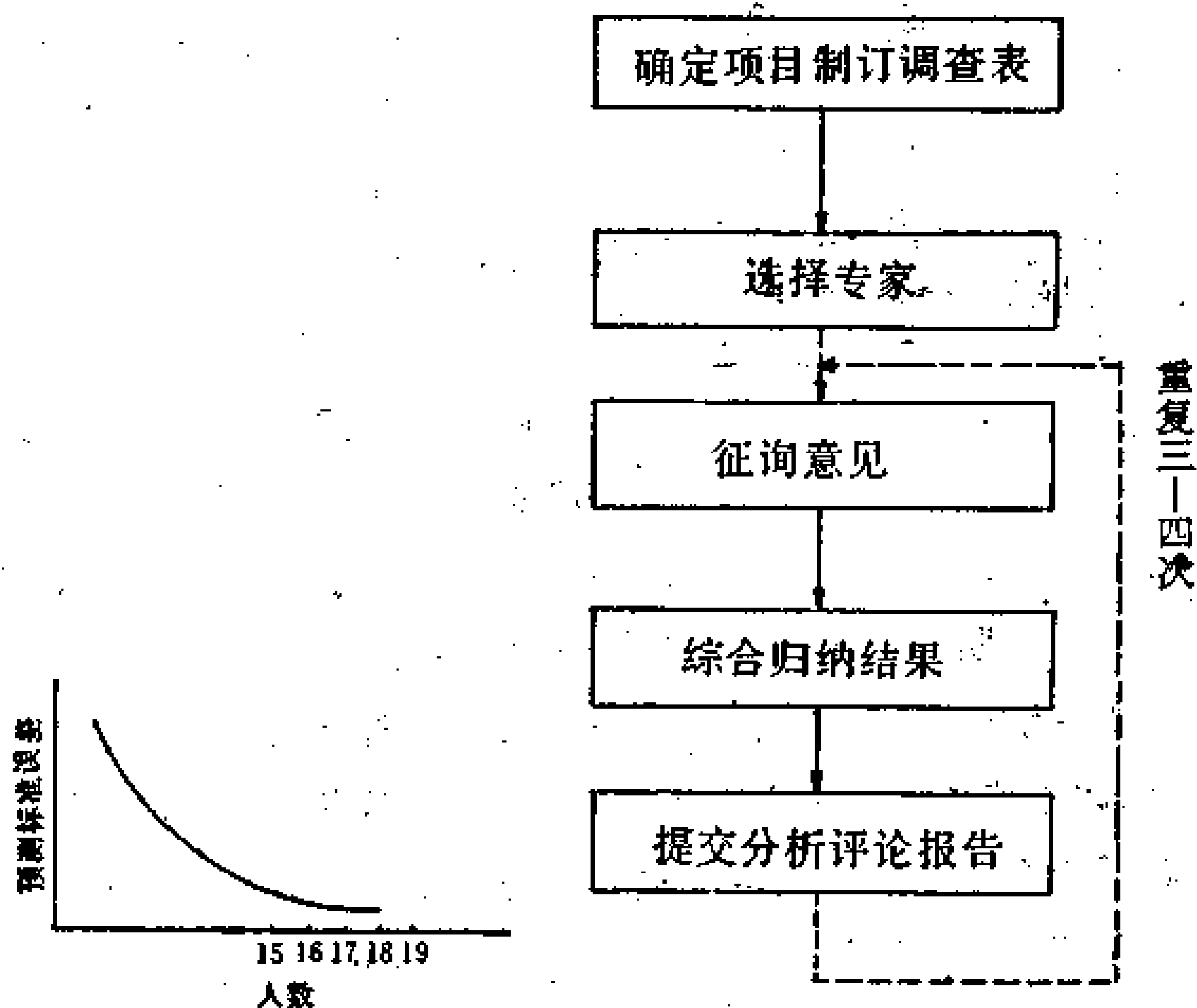


图 8·16 专家人数与预测误差的关系 图 8·17 特尔斐法的预测程序

应用特尔斐法,由于专家意见的概率分布接近或符合正态分布,所以在预测过程中,就有可能对专家意见的数学特征作统计学处理。对于预测事件实现的时间,就是把专家的意见,在水平轴上按时间先后顺序排列,将分布的全距四等分,中位数代表小组的评价意见,上下四分位代表专家意见分散程度,以楔形图来表示。由于大多数专家意见趋于中位数周围,意见在上下四分点外的专家人数有限,所以预测结果常用表达方式之一是截角楔形图,见图 8·18 所示。

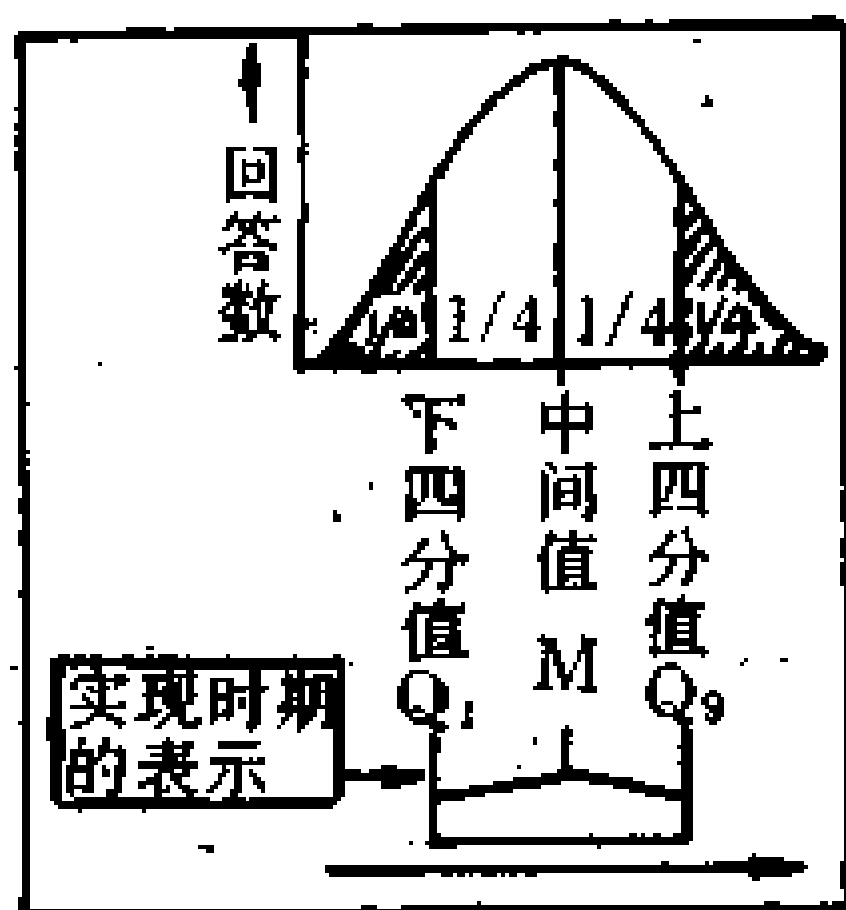


图 8-18 实现时期的表示法

自特尔斐法运用于预测以后，许多专家对它作了进一步的研究，并对经典的特尔斐法作了补充和原则上的修正：减少应答的轮次，实验表明一般通过两轮以后，专家意见已可达到相当的一致；在预测时向专家提供背景资料，必要的政治、经济、科技发展的趋势，市场需求的信息，以及

有关政策；对预测事件给出多重数据，要求专家提供三个概率不同的日期；部分取消匿名性，先匿名询问，尔后公布结果，进行口头答辩；部分取消反馈，只向专家反馈四分点，而不提供中位数，防止简单地向小组中位数靠拢，回避提出新评价和论据的倾向。所有这些工作使得特尔斐法进一步得到完善，成为现代定性预测的主要方法之一。

特尔斐法固然有很多优点，但它没有考虑形成未来的各事件间内在联系，即各事件间的交叉影响。1968年 T·J·格登和 H·汉瓦德提出交叉影响法，研究各关联事件间的相互关系，预估每一事件发生的概率。交叉影响法，是用来确定一系列事件 $D_i (D_1, D_2, \dots, D_m, \dots, D_n)$ 及其概率 $P_i (P_1, P_2, \dots, P_m, \dots, P_n)$ 之间的相互关系。如果 D_m 事件发生，即 $P_m = 1$ ，求 D_m 对 $D_1, D_2, \dots, D_n$ 的影响，即求 $P_1, P_2, \dots, P_n$ 的变化。以美国的未来一定时期内的能源政策为例，与能源政策有关的因素简化为： D_1 用煤取代石油，其概率 $P_1 = 0.8$ ； D_2 降低石油价格，其概率 $P_2 = 0.4$ ； D_3 控制空气、水质标准，其概率 $P_3 = 0.3$ 。这些

因素(事件)之间的关系($\uparrow$)表示交互影响为正,即该事件的发生增进了另一事件发生的概率,($\downarrow$)表示交互影响为负,说明该事件的发生将降低或消除另一事件发生的概率,(-)表示无影响,从而建立事件间基本关系的交叉影响矩阵:

如发生该事件	发生概率	对诸事件的影响		
		D_1	D_2	D_3
D_1	0.8	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
D_2	0.4	$\downarrow$	-	-
D_3	0.3	$\downarrow$	$\downarrow$	-

在决定了事件之间的关系及作用的性质以后,还要确定相互影响的程度,即相互联结的强弱。如果 P_{ij} 是 D_{ij} 事件发生前的 D_{ij} 的概率, P'_{ij} 是 D_{ij} 事件发生后 D_{ij} 的概率, K 表示交互影响的性质,取值为 -1 或 +1, -1 为加强联结, +1 为减弱联结, S

按表中所列的 KS 值的档次:

序 号	影响性质	相应的 KS 值
1	无影响	0
2	弱的下降影响	+0.5
3	弱的增加影响	-0.6
4	强的下降影响	+0.8
5	强的增加影响	-0.8
6	很强的下降影响	+1.0
7	很强的增加影响	-1.0

表示相互影响的强度,取值 0~1 之间,数值越大代表 D_n 对 D_m 的影响越强,0 表示无相关,这样就可以建立交互影响的方程:

$$P'_n = P_n + KS \cdot P_n(P_n - 1)$$

要求专家对各事件交叉影响方向和强度作出判断,然后利用特尔斐法将专家对交叉影响的判断,转化为一致的 KS 值,利用上述方程,就可以确定交叉影响的程度①。

三、定量预测方法

定量,主要是确定对预测目标(Y)的因素影响量(X),时间影响量(t)和不同预测目标之间的相互影响的比例量。定量预测方法与专家经验判断不同,它是建立在统计资料基础之上,以长期的历史资料为依据,并以预测对象过去、现在、将来都是平衡发展为前提的。在定量预测技术中,最一般的是时间序列分析、因果关系分析。

任何预测对象、预测目标和对预测的影响因素,都有着一一定的时序,即各自的时间演变过程。时间序列分析就是研究预测对象自身变化过程及其发展趋势,通过对反映预测对象和影响因素时序分析,找出它的规律性,根据时序 Y_t 过去的演变特征来预测未来 Y_{t+L} 。时间 $t = 1, 2, \dots, T$, Y_t 是按发生时间顺序排列的(历史)统计数据 $Y_1, Y_2, \dots, Y_T$ 。如果未来趋势是线性的,其数学模型:

$$Y_{T+L} = a_T + b_T L$$

① 参见霍俊:《实用预测学》;孙明铨:《经济技术预测和评价》,中国展望出版社 1984 年版。

其中, L 为由 T 到需要预测的单位时间数,(例如5年、10年), a_T 为截距, b_T 为斜率,即单位时间增减量, Y_{T+L} 就是根据 Y_t 过去的演变对未来变化的预测值。

因果关系分析,它是研究预测对象与影响因素之间的因果关系及其影响程度的方法,根据影响因素的未来数据推算预测对象的未来数据。与预测目标(事件)相关的因素很多,但并不是每一个相关因素对预测分析都有重要影响的,只有选择那些在因果上有必然联系,有前因必有后果的因素对预测才是有意义的。例如,能源消耗量与整个国民经济总产值有关,我们可以根据历年统计数据确定两者因果关系,从2000年我国国民经济发展的情况来推算出能源在本世纪末消耗的总量,从而制定能源发展的规划。确定了因果关系,就可以建立变量之间的数学关系式,因变量 Y 为预测目标,自变量 X 则为影响因素,如果它们之间关系为线性,则 $Y = a + bx$;若非线性,则 $Y = a + b_1x + b_2x^2$,其中 a 、 b 都是方程系数, a 表示 Y 与 X 在起始点 a 上开始演变, b 表示 X 与 Y 之间的比较关系。如血压与年龄关系 $Y = 100 + x$, x 代表年龄是自变量, $a = 100$,是经验常数,一般人血压高压以100毫米汞柱为起点,这里比较关系 $b = 1$,年龄每增长一岁,人的血压高压大约增加一个毫米汞柱,利用这一方程式,就可以测算每个人随着年龄增长,血压高压的大致变化的趋势。

无论是时序预测分析,还是因果预测分析,进行定量预测,建立和求解数学模型的关键是求方程的系数。求系数 a 、 b 的方法很多,如在时序预测中,用指数平滑法所求得的系数叫平滑系数,依据回归法求得的系数为回归系数。这里只介绍最简单的

一元线性回归法,其求回归系数的公式:

$$\begin{aligned} a &= \bar{Y} - \hat{b}\bar{X} \\ \hat{b} &= \frac{\sum X_i Y_i - \bar{X} \sum Y_i}{\sum X_i^2 - \bar{X} \sum X_i} \end{aligned}$$

式中 $\bar{X}, \bar{Y}$ 为平均值, 即 $\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}$, $\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}$, 这一公式是根据数理统计推导出来的。经过分析判断认为反映历史数据演变规律即方程式: $Y = a + bx$, 可以作为预测规律来应用, 则在 Y, a, b 上加符号 “ $\hat{}$ ” 表示预测值: $\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b}x$, x 是自变量, 预测值与实测值之间的误差为 e_i , 运用这一预测模型, 就可以对预测目标进行预测。

在经济预测中, 如果预测未来某一时期社会消费水平, 消费量 Y 就是预测目标, 然后确定影响因素, 影响社会消费的因素很多, 与国民的收入、商品的价格与商品的质量、品种都有关系。为了简化, 这里只考虑收入与消费的关系, 收入 X_i 为因, 消费 Y_i 为果。接着就要收集收入量 X_i 与消费量 Y_i 的历史统计数据, 并将其计算值列入表:

i $1 \leq i \leq n$	X_i (收入)	Y_i (消费)	$X_i Y_i$	X_i^2
1	100	80	8,000	10,000
2	200	150	30,000	40,000
3	300	210	63,000	90,000
4	400	260	104,000	160,000
($n=$)5	500	300	150,000	250,000
$\sum_{i=1}^n$	1500	1000	355,000	550,000

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{1500}{5} = 300, \bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n} = \frac{1000}{5} = 200,$$

表中 $i=5$ 为历史统计数据点。用回归法求系数 a 与 b ;

$$b = \frac{\sum X_i Y_i - \bar{X} \sum Y_i}{\sum X_i^2 - \bar{X} \sum X_i} = \frac{355,000 - 300 \times 1000}{550,000 - 300 \times 1500} = 0.55$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} = 200 - 0.55 \times 300 = 35$$

将 a, b 值代入一元线性方程式 $Y = a + bx$, 就可以得到收入与消费的预测模型;

$$\hat{Y} = 35 + 0.55X$$

就可以对预测目标 Y 进行预测了。如未来的某一时期, 当收入水平达到 1000(单位)即 $X = 1000$ 时, $\hat{Y} = 35 + 0.55 \times (1000) = 35 + 550 = 585$ (单位)。预测值与统计资料会有一定的误差 e_i , 这就要求在预测中对置信区间的上下误差要进行一定的限制, 力求 e_i 的绝对值为最小。

定量的方法很多, 应该按照预测对象(事件)的性质来选择适当的方法, 对于变化过程只与事物的近期状态有关, 而与过去状态无关, 即无后效性的那类随机现象, 就不需要大量的历史统计资料, 只需近期资料就可以运用马尔可夫分析预测法进行预测。

第五节 系 统 决 策

一、人类的决策活动

决策是指为了实现一个特定目标, 在占有一定信息和经验

基础上，根据客观条件与环境的可能，借助于一定的方法，从各种可供选择的方案中，选出作为人们行动纲领的最佳方案的活动。决策正确与否，至关重大，特别是涉及全局性、战略性的决策，关系到国家的前途、命运，关系到各项事业的成败、兴衰。

决策作为人类社会的一项实践活动，具有以下特点：1. 存在着决策者无法加以控制的各种状态。在竞争性活动中，对方可能采取的策略，商品生产中的市场需求，工程施工中的晴天还是雨天，决策者一般是无法控制的，统称为“自然状态”。2. 有两个或两个以上可供选择的行动方案。人们把毫无选择余地的所谓“选择”，称之为“霍布森选择”，这在决策活动中是非常忌讳的。^① 3. 决策总是为了达到某一个既定的目标，在几个可供选择的方案中选择最优的。没有目标，就无从决策，而不追求优化，决策也就毫无意义。4. 任何决策最后要付诸实施，不准备实施的决策则是多余的，这是作为人类的社会实践活动的决策不同于一般判断的地方。

虽然，在日常生活、工作中，在处理一些具体问题，人们对自已的行为也常常进行选择，如选购商品、选择路线等一类事情，但习惯上很少使用“决策”的大字眼。然而，一般说来，只要对某一问题面临几种自然状态，又有几种可供选择的方案，这就构成了一个决策问题。

① 1613年英国有一卖马的商人名叫霍布森，为了招揽生意，扬言可以让顾客任意挑选。但同时又附加一个条件：只许挑最近门边的那匹马，这个条件等于不让顾客挑选。后人讽刺这种毫无选择余地的“选择”为“霍布森选择”。

人类的决策活动有着悠久的历史。早在古代，人们在长期的社会实践中就有了决策思想的萌芽，就有“运筹帷幄，决胜千里”之说。《战国策》、《孙子兵法》、《史记》、《资治通鉴》、《三国志》、《盐铁论》等著作中就记载了许多我国古代的经济、政治、军事等方面决策的事例和决策的思想。但古代人类社会实践活动，在其广度、深度上还是极其有限的，与社会的小生产方式相适应的，决策活动主要凭借于决策者个人的才智与经验。被列入《武经七书》之首，称之为“世界古代第一兵书”的《孙子兵法》，是孙武对春秋时期各国战争、吴国伐楚的经验总结和他自己平时与吴王研究军事的一些言论整理而成的，虽经孙臆增补，曹操编注为计篇、作战篇、用间篇等十三篇，较系统地论述了指导战争的战略与策略，但多半也还是带经验性的。

从十五世纪起，经过简单协作、工场手工业发展到大工业，由小生产的生产方式发展到了社会化的大生产。所谓生产社会化，正如恩格斯在《反杜林论》中所指出的，是把属于生产者自己的分散的有限的生产资料加以集中和扩大，从个人的生产资料变为社会化的，即只能由大批人共同使用的生产资料，生产本身也从一系列个人的行动变成了社会的行动，产品从个人的产品变成了社会的产品。^①二十世纪以来，随着生产社会化的进程，带来了社会活动的一系列变革，这主要表现在社会生产活动、科学研究以及其它社会活动规模越来越大，社会系统结构越来越复杂，因素也更多，而且越来越多变。这就使得人类决策活动的不确定因素增加了，因而风险性也增加了，往往失之毫厘，差之千里，稍一不慎，就会造成决策的失误。社会系统的各方面千丝

^① 《马克思恩格斯选集》，第3卷，人民出版社1972年版，第309页。

万缕地联系在一起,系统内部各因素之间,系统与环境之间构成了一个复杂的耦合关系,也往往牵一发而动全身,引起连锁反应。一项决策的执行所带来的后果,不仅涉及大量的人力、物力、财力,而且对社会影响要持续相当长的时间,类似人口问题、环境保护问题,决策的错误所付出的沉重代价,甚至要经过几代人的努力才能偿付的。因此,在现代仅仅凭借领导人物和谋士个人的才能和主观判断,企图驾驭现代复杂的“社会机器”,而期望取得成功就比较困难。为了防止决策的重大失误,要求决策科学化,决策本身也由经验发展到了科学。

由于运筹学、系统理论、信息科学、控制论的相继问世,以及计算机广泛运用于人类的决策活动,为决策从经验到科学提供了现代的理论、方法和手段,使得决策由定性分析进入到定量化的阶段。从本世纪五十年代开始,出现了决策方法的数学化、模型化及计算机化。首先借助于现代数学工具将目标进行量化,找出各因素之间的相互关系,建立模型,然后运用计算机和数学工具对各种方案进行比较分析,对可能产生的后果进行科学的预测,最后作出最佳的决策。应该说这是决策方法的一次重大突破,是人类决策活动发展史上的一个里程碑。

决策方法的数学化、模型化与计算机化,增强了决策的科学性,并且取得了举世公认的成效。但是,也使有些人产生了一种错觉,似乎现代的决策问题,唯有同数学模型描述,运用计算机来解决才是可靠的,从而夸大了定量方法在决策中的作用,忽视其它社会、自然、心理等因素对决策活动的影响。到了七十年代,人们逐渐认识到仅靠数学方法和计算机等技术手段,还不可能作出正确可靠的决策,盲目追求决策方法的数学化,可能隐藏

着一种把决策问题陷入繁琐的数学模型圈子里的危险，而必须把定量分析与定性分析相结合，既要依靠数学方法和计算机等现代的决策手段，又要充分考虑决策的社会心理和组织行为方面的因素，充分发挥人的经验和创造性在决策中的作用，从而出现硬技术与软技术结合的趋势。一方面象作为概率论、数理统计和自动控制理论的一个分支的运筹学和大系统理论，过去着重于通过数学解析手段求最优解的方法，而现在大力采用模拟技术，引入偏爱信息，运用效用理论、加权等方法，使决策的硬技术软化。另一方面又把特尔斐法等专家法一类软技术运用于决策过程，从而提高了决策的可靠性。

二、决策的类型

关于决策的类型，目前国内外有很多分类的方法。有的按决策问题的性质分为战略性决策与策略性决策两大类；有的则按决策机构在系统组织中的地位划分为高层决策、中层决策、基层决策三种类型；也有的按能否用数量表现而分为数量决策与非数量决策；还有的分为单项决策和序贯决策（即静态决策与动态决策）等。但是，比较有代表性的、影响较大的则是西蒙和卢斯等人的分类。

H·A·西蒙从方法论的角度，将决策分为“程序化”和“非程序化”两类。^① 程序化决策问题是指重复出现的一类决策问题，这类决策因为过去有过反复处理的经验，在长期处理这类决策

^① “程序”(Program)一词是从计算机科学中借用来的，西蒙在这里使用“程序”指的是一种战略，或是一种详尽的战略指示，它控制该系统对某复杂工作环境作出的一系列反应。

的实践中,逐渐摸索出这类决策问题的规律性,从而可能制定出一套固定的程序,凡是遇到这类决策问题,就可以依据以往的经验,用常规办法和已确定的程序来进行处理。非程序化决策,指的是这类决策问题比较新颖,过去尚未发生过,或因其性质和结构尚捉摸不定,处理这类问题没有以往的经验可以依据,因而无法用常规的办法和已确定的规范、程序来进行处理,而必须依靠决策者的知识、经验,以一种探索性的方式获得这类问题的解决。由于程序化与非程序化是按决策问题是否重复出现来进行划分的,所以也有人把程序化决策称为重复性决策,而称非程序化决策为一次性决策。

正如西蒙要求人们经常自我提醒:“世界大都是灰色的,只有少数几块地方是纯黑或纯白”的那样,在许多非程序化决策过程中,其中也可能包括某些部分过去曾经处理过的。因而,程序化与非程序化并非截然不同的两类决策,“而是象光谱一样的连续统一体,其一端为高度程序化的决策,而另一端为高度非程序化的决策。我们沿着这个光谱式的统一体,可以找到不同灰色梯度的各种决策,而我采用程序化和非程序化两个词也只是用来作为光谱的黑色频段与白色频段的标志而已。”^①西蒙选择了决策的“光谱统一体”的两端,把决策问题划分为两种类型,那么中间几乎全是空白,在这一光谱式的统一体中,试图找到不同灰色梯度的各种决策,但由于“梯度”无法确定,界线就显得非常模糊了。

美国的卢斯(R. D. Luce)和莱伐(H. Raiffa)提出了另一种

① 西蒙:《管理决策新科学》,中国社会科学出版社1982年版。

分类原则,即按决策问题所处的条件不同而划分为确定型决策、风险型决策和不定型决策。这里所说的所处条件,指的是决策环境,即按自然状态出现概率的确知程度,把决策问题划分为三类。这种分类方法,较好的反映出各类决策之间的联系,并且能够在此基础上建立起决策结构的矩阵模型:

		S_j			
		S_j			
		S_1	S_2	S_j	S_n
a_{ij}	P_j	P_1	P_2	P_j	P_n
		P_1	P_2	P_j	P_n
A_i	A_1	a_{11}	a_{12}	a_{1j}	a_{1n}
	A_2	a_{21}	a_{22}	a_{2j}	a_{2n}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	A_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{ij}	a_{in}
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
	A_m	a_{m1}	a_{m2}	a_{mj}	a_{mn}

其中, A_i 为决策变量(方案), S_j 为状态变量(自然状态), P_j 为 S_j 出现的概率, a_{ij} 则是指在概率为 P_j 的 S_j 的状态下,方案 A_i 产生的结果(益损值)。确定型、风险型、不定型决策问题之间的区别和联系在于:确定型是指在 S_j 状态下的概率 P_j 为 1 时的这类决策问题;而把 $P_j = 0$,即概率不知道的这类决策问题规定为不确定型;当其概率 P_j 在 0 与 1 之间,即 $0 < P_j < 1$ 的决策问题为风险型决策。

由于客观状态并不都表现为概率统计的特征,仅以客观概率还不能完全划分和概括所有决策问题。所以,后来有人在这

三种决策之外,又加了竞争型决策,这类决策问题的特点就是存在着与一个决策者对立的另一个决策者,双方都根据对方可能采取的策略而使用不同的对策。

决策问题的不同类型之间的区别是相对的,它们之间有着一定的联系,而且在一定条件下可以相互转化。不定型的决策问题是一种对这一决策问题有关信息很少的情况下进行的决策,那么只要设法收集到关于对象和环境的真实的、足够的有用信息,不确定型问题就转化为随机型问题或确定型问题。因而,也就可以用处理确定型和风险型决策问题的方法来进行解决了。

三、决策的过程

人类的决策活动是一个为了实现一定的目标,从各种可供选择的方案中,选出最佳方案并付诸实施的过程。决策的过程随情况不同而异,但一般遵循的步骤(见图 8·19)是:发现问题;确定目标;找出各种可供选择的方案;对各种方案进行评估,选择其中最好的方案;执行。

一、发现问题。人类社会的任何决策活动,其过程首先从发现问题、提出问题开始,它是系统分析的起点,因而也是决策的起点。一项重大决策的价值,在很大程度上取决于问题本身的价值。正在世界范围内兴起的新技术革命,对人类社会的发展将会产生极其深刻的影响。这对正在进行现代化建设的社会主义中国来说,既是一个挑战又是一个机会,或者是抓住时机直接采用新的科学技术成果,超越某些传统的发展阶段,缩小我国同经济发达国家在经济上、技术上的差距,加速四化建设的进程;或

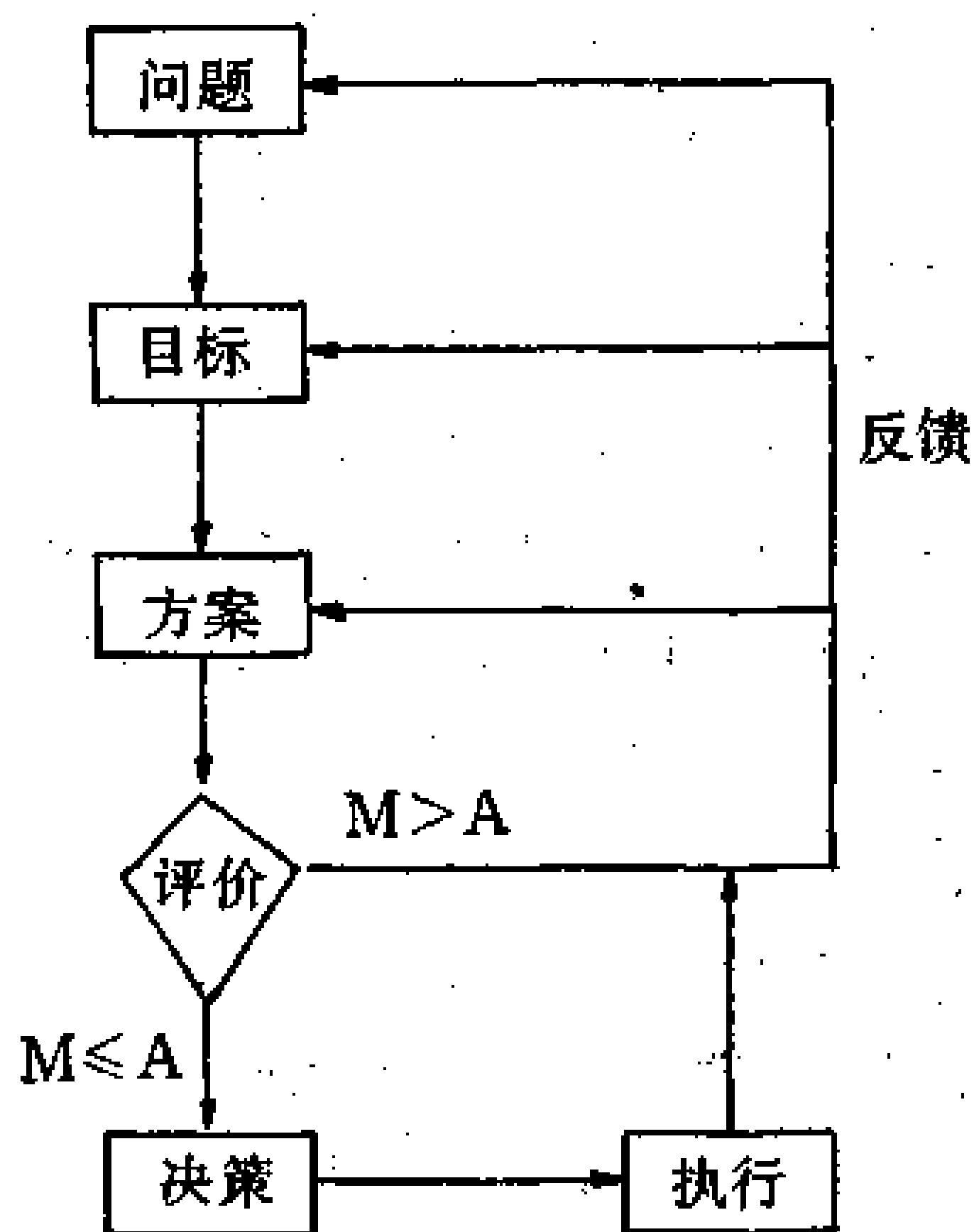


图 8-19 决策过程模式

M: 目标 A: 方案

者是漠然视之,丧失时机,使我国同世界发达国家的差距扩大。而要确认、提出并抓住这个问题,并不是一件轻而易举的事,需要决策者的卓越的见识和无畏的胆略。在目标分析中已经指出,问题一般都以差距的形式表现出来。把应有的标准与实际情况之间进行比较,找出它们之间的差距,这有点象医生诊断一样,以健康人作为标准,把病人同健康人加以比较,找出两者之间的差距,进而分析产生差距的原因,然后作出正确的诊断,对症下药。所以在现代决策理论中,又把发现问题的阶段称作诊断阶段,作为决策的前提和确定目标的依据。

确定目标。关于系统目标,在系统分析那一章已经作了详细的阐述,这里着重指出确定决策目标应遵循的基本原则。决

策目标是根据需要与可能确定期望达到的结果，因此建立目标首先要求切合实际，也即经过努力可以争取达到的。决策目标不同于一般口号，口号可以是豪言壮语，而决策目标必须是切实可行的。在迎接新的技术革命挑战，进行发展战略的对策研究中，确定本世纪内我国的技术发展战略目标时，就必须根据国民经济翻两番这一总目标，以及我国经济、科学技术水平和资源条件，采取“有限目标，突出重点”的方针，以避免过去曾经出现过的盲目追求“全面赶超”和“洋冒进”的错误。另外，决策目标也不同于一般号召，除了前面已经指出的要有明确的边界条件，有一定的时间、空间的限制和一定的数量要求以外，还要求自然语言表述上的单义性，不能含糊不清，模棱两可。过去我们虽然年年宣传计划生育，但由于目标不明确，结果年年“超产”，因为计划生育的“计划”可以作多种的理解。现在党中央提出到本世纪末把人口控制在十二亿以内的目标，为了实现这一目标，提倡一对夫妇生育一个孩子，限制二胎，既有明确的边界条件，又有数量的要求，并且把计划生育具体化为一对夫妇生育一个孩子。由于目标明确，因而家喻户晓。

制定方案即制定策略，主要是根据既定的目标，依据主客观条件，设计出供决策者选择的实现目标的各种方案。设计方案一般都运用模型方法，按照问题的性质，建立一个相应的模型，然后在模型上改变和选择各种参数，提出各种预选方案。人口预测，就是应用现代控制论的方法，通过建立人口发展的数学模型，精确地计算出未来人口发展的各种数据，对未来一百年内我国人口发展趋势作出科学的预测，提出控制人口发展的各种方案，制定出相应的对策。设计方案必须遵循三条原则：一

是方案的可行性,即对构成这些方案的自然、社会等主客观条件具备可行性;二是方案的客观性,方案的设计者由于自己所处的地位和环境往往容易受到个别领导意见或行政干预所左右,以及个人、团体利害关系所制约,从而影响了方案的客观性,因此要求方案制定者排除各种人为因素的干扰,尊重科学,坚持真理,按客观规律办事;三是方案的详尽性,实现同一目标,可能有多种途径和方法,尽可能根据不同的条件而设计多种方案,给决策者有更多的选择余地。方案的非详尽,就会漏掉某些方案,甚至漏掉最好的方案。

决策,就是在可供选择的方案中,选出一个最佳方案,或者在各预选方案中综合出一项新的决策方案。一般选择以最低代价、最短时间、最佳效果实现既定目标的那一个方案。但有时并不如此,因为决策者还需要考虑到其它各种因素的影响,以及对决策实施可能发生的各种后果的严重程度进行权衡、比较,选择并不是原来认为最好的,而是选择风险性较小的方案。因此,决策者并不是仅仅在供选择的方案中打勾、画圈就行了,而是需要依靠决策者的丰富经验、知识和敏锐的洞察力。决策,是整个决策过程中最关键的一个环节,决策一旦作出,就要按此付诸实施。

反馈。在决策的实施过程中,可能由于系统内部或外部的干扰,或者由于执行过程中出现的某种错误,使得实际实施的结果与目标给定值之间产生偏差,这就需要及时将这方面的信息输送到决策系统,以便对原方案进行修正,或者对实施过程进行控制,采取措施,使其不偏离系统的总的目标。

在决策过程的各个阶段,都贯串着信息的获取与处理。科学

的决策,要求信息准确、及时、完整。准确就是可靠,原始信息不被污染。如果信息不可靠,根据错误的信息作出的决策必然也是错误的。从这个意义上讲,假信息比无信息更坏。造成原始信息失真的原因很多,可能是由于传递过程中,通过通道时多次污染、干扰,或是对原始信息进行分析处理中,渗杂了个人主观的因素,作出错误的判断,并给上级领导机关提供不真实的信息。所谓及时,指的信息传递速度要快,不能迟后。如果信息不及时,就会延误时机,从而失去了它的价值。完整,就是要求情况收集得比较全面,如果以偏概全,仓促决策,也会造成决策失误。当然,由于主客观条件的限制,有时只能根据有限信息作出决策,这带有一定风险性,因而需要更加谨慎。

虽然决策程序不可能是一成不变的,但在一个确定的完整的决策过程中,它的程序也应是确定的,不能任意略去某一环节,其顺序也不能随意颠倒。

四、决策的方法与策略

系统科学已经取得的成果,为现代决策提供了理论和方法,但同其它一切方法一样,它的生命力就在于根据不同类型、不同情况,运用不同方法,采取不同策略。

确定性决策,它是在自然状态完全确定,每一种方案执行后产生的结果是已知的情况下进行的一种决策。处理这类决策问题的方法很多,对变量数目少的离散型问题,可以通过简单列表判断,把各种方案的收益列出,用比较方法在完全确定的状态下选择满足目标要求的最佳方案,从而选定其中一个方案。对于单变量的连续型问题,通常可以将决策问题按区间加以分段,变

为离散问题处理。而解决多变量、多约束的决策问题,则可以利用“数学规划”方法。连续型可用线性规划、非线性规划;离散问题可用整数规划。对于这种性质的决策,一经确定就要竭尽全力予以实施,如果决心不大,实施不力,拖拖拉拉就会错过时机,这样即使是最好方案,也会因时过境迁而得不到最佳的结果,“机不可失,时不再来,”要当机立断,而不能优柔寡断。

风险性决策。它与确定性决策不同,它的结果不但受决策变量(控制变量)的制约,而且还要受自然状态即状态变量的影响,因而决策者采用某一行动可能产生的后果无法确定,但又可以根据过去出现的概率进行决策,这种决策带有一定程度的风险性,故称风险性决策。例如,建筑公司承包一项工程,决定下月是否开工。如果晴天按期完工可获利 50,000 元,如果施工后天下雨则将造成损失 10,000 元,如不开工则不论天晴、下雨都要付出由于窝工而损失的 1000 元,根据以往的经验 and 气象统计资料,这段时期天晴概率只有 0.2,天雨的概率 0.8,为使获利最大、损失最小,决策者应从开工与不开工,两个方案中选择其一,这就是风险性决策。风险性决策是以最大收益期望值或最小损失期望值作为决策的准则。期望值就是方案 A_i 在自然状态 S_j 条件下所产生不同概率的收益或损失的平均值,它等于该方案在不同自然状态下益损值 V_{ij} 与其发生的概率 P_j 的乘积之和;由此可归纳成求期望值的一般式:

$$E(V_i) = \sum_{j=1}^n V_{ij} P_j, \quad i=1,2,\dots,m$$

以益损期望值为决策准则的风险性决策,通常使用决策树的方法。决策树(图 8.20)中,以□表示决策点;以○表示自然

Δ_{ij} a_i	S_j P_j	天 晴	天 雨	益损期望值 $E(V_i)$
		$P_1 = 0.2$	$P_2 = 0.8$	
a_1 (开工)		50000	-10000	$E(V_1) = 50,000 \times 0.2 + (-10,000) \times 0.8$
a_2 (不开工)		-1000	-1000	$E(V_2) = (-1,000) \times 0.2 + (-1,000) \times 0.8$

状态点或称事件点；而树枝表示一个策略或事件，表示事件时要注明发生的概率；终点用 $\triangle$ 表示，是事件的结果，各种方案在不同自然状态下的损益值。在决策时首先按问题的性质绘制决策树；根据概率分析的概率值和相应的损益值，计算出各事件的损

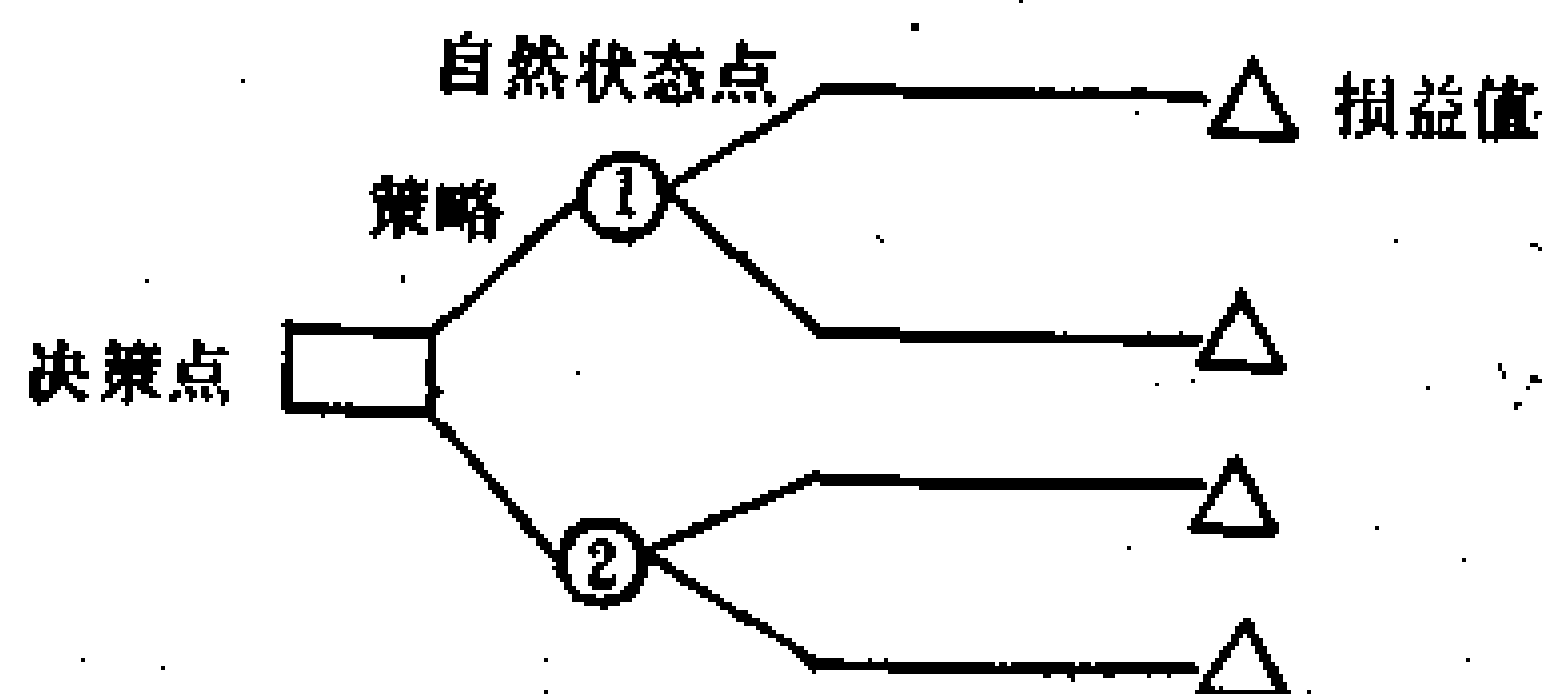


图 8.20 决策树示意图

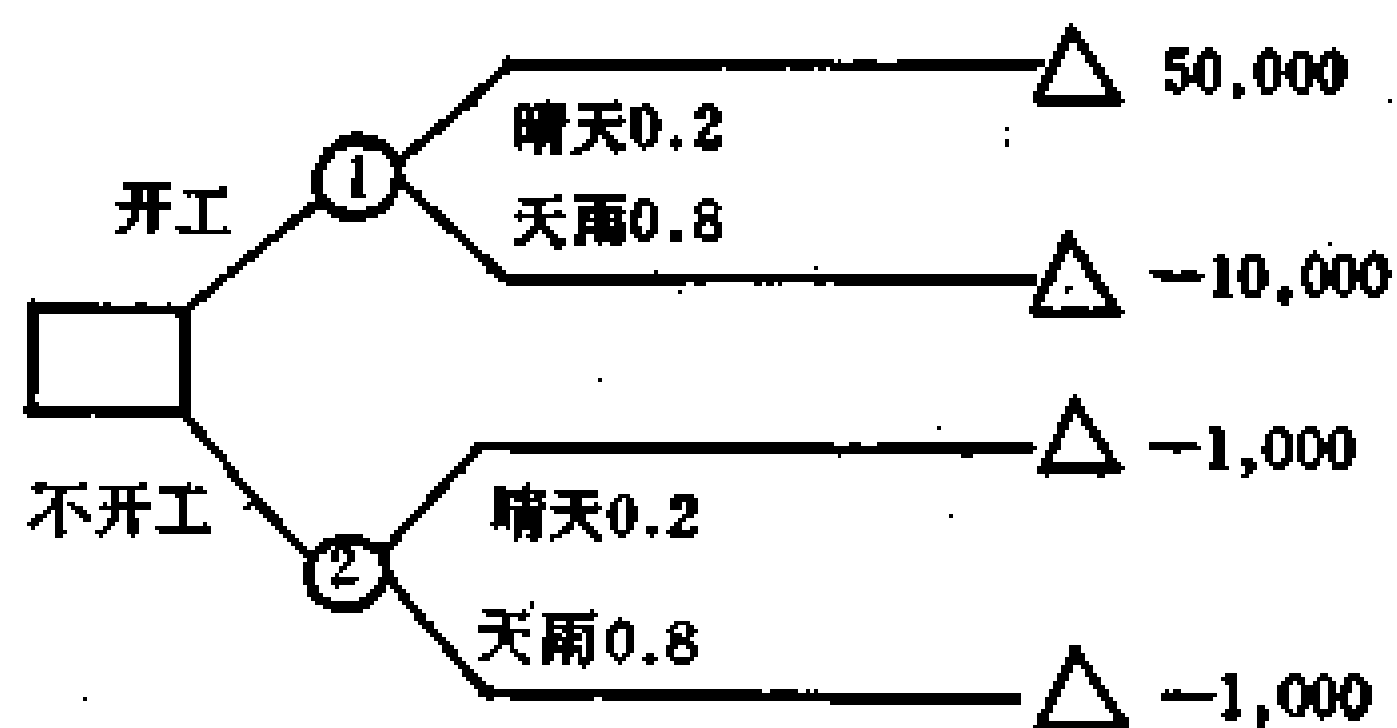


图 8.21

益期望值；然后修枝，根据事件点的期望值大小选择最优方案，修去其它分枝，即落选的方案；最后在决策点作出决策。上例的施工问题，就是将有关数据列成表后，根据损益表画出决策树计算各事件点的损益期望值：

$$\begin{aligned}\text{开工的期望值 } E_1 &= 0.2 \times 50,000 + 0.8 \times (-10,000) \\ &= 2,000\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{不开工的期望值 } E_2 &= 0.2 \times (-1,000) + 0.8 \times (-1,000) \\ &= -1,000\end{aligned}$$

根据最大收益期望值或最小损失期望值决策准则，比较 E_1 与 E_2 的损益期望值，选择开工的方案。但由于只有 0.2 概率，风险性较大，因而一方面要根据自身所能承担风险的能力，确定风险阈值；另一方面决策者要充分估计可能出现的情况，准备应变方案和保险手段，一旦发生不希望出现的事件（如下雨），就能因事前已有准备，不致束手无策，使由此造成的损失减少到最低限度。风险性决策切忌孤注一掷。

非确定性决策，这是指决策者对各种事件出现的概率全然不知，也无经验统计数据可遵循，即在外界条件无法预知的情况下进行的决策。例如一个工厂生产某种新产品，生产新产品的方案有三个：大量生产、批量生产、小批试产，每一种方案在不同市场需求情况下，收益也不同。如下表所示，在大量生产情况下，如果产品畅销可获利 80 万元，销路一般获利 40 万元，滞销则要亏损 60 万元；批量生产在三种不同情况下的收益值分别为 55 万元、30 万元、-40 万元；而小批试产的收益在不同销路情况下分别为 35 万元、35 万元和 -1 万元。但是我们对于未来市场的需求信息无法确切知道，需要在完全不了解的情况下进行

决策，选定方案。现代科学提供了不确定性决策某些选择方案的原则：

单位：万

销路 益损值 方案	畅销(S_1)	一般(S_2)	滞销(S_3)
大量生产(A_1)	80	40	-60
批量生产(A_2)	55	30	-40
小批试产(A_3)	35	35	-1

1. 等概率的平均法则。既然概率很难确定，那么可以把不同方案以等概率来处理，把各种可能情况下的每一方案的收益加以平均，然后进行比较，取其中最大值的一种方案。上例中， $E_1 = \frac{1}{3}(80 + 40 - 60) = 20$ ， $E_2 = \frac{1}{3}(55 + 30 - 40) = 15$ ， $E_3 = \frac{1}{3}(35 + 35 - 1) = 23$ ，可以看出第三个方案 E 值最高，按平均法则应选第三方案。

2. 大中取大的乐观法则。就是在最有利，即畅销的情况下，每个方案的最大收益(80, 55, 35)进行比较，选择其中最大的值所对应的那个方案——方案 1 进行生产。

3. 小中取大的悲观法则。就是选择效益最小的情况下最小效益值为最大的方案，即在产品滞销的情况下，收益值为最小(-60, -40, -1)，而在它们之中再选择益损值为最大的第三方案进行生产。

4. 大中取小的遗憾法则。这个法则是以遗憾值——期望的最大效益值与实际的收益值之间的差距为最小的方案是最佳

方案。其计算方法，是在收益矩阵的每一列中选最大的一个元素，将这一列中每个元素都减去这个最大值，得出遗憾矩阵：

	S_1	S_2	S_3
A_1	$(80-80)=0$	$(40-40)=0$	$(-60-1)=-61$
A_2	$(55-80)=-25$	$(30-40)=-10$	$(-40-1)=-41$
A_3	$(35-80)=-45$	$(35-40)=-5$	$(-1+1)=0$

从表可知，第一方案在 S_3 时会造成 61 万元的~~最大~~遗憾，第二个方案在 S_3 造成 41 万元的~~最大~~遗憾，第三种方案在 S_1 造成最大遗憾 45 万元，按最大遗憾最小的原则应选择方案 2。

非确定性决策，其不确定性比风险性决策更大，因此更需谨慎从事，切勿轻率、莽撞，要注意信息反馈，随时掌握执行情况，及时进行调整。

竞争性决策，决策者的另一方不是自然界，而是同决策者一样的人，双方都在考虑对方如何决策，从而选择对自己最有利的策略，所以又称对策问题。如两军对战、外交谈判、商业竞争、体育竞赛，成败得失要依赖于决策者所选取的策略。因此此类决策问题是由三个基本要素，即局中人（竞争的双方）、策略、一局对策的得失所构成，它的最基本模式就是两人零和有限对策。所谓两人零和有限对策，就是参加对策的局中人是两个，每个局中人有有限个可供选择的策略，任何一个局势中两个局中人的得失之和为零，一人所得，必为另一人之所失。古代田忌与齐王赛马的故事，就是一个两人零和有限对策的问题，田忌与齐王各有六个策略，其得失，可以用支付矩阵表示：

在这类对策中，各局中人根据什么来比较自己策略的优劣

田忌 齐王	b_1 (上中下)	b_2 (上下中)	b_3 (中上下)	b_4 (中下上)	b_5 (下中上)	b_6 (下上中)
a_1 (上中下)	3	1	1	1	1	-1
a_2 (上下中)	1	3	1	1	-1	1
a_3 (中上下)	1	-1	3	1	1	1
a_4 (中下上)	-1	1	1	3	1	1
a_5 (下中上)	1	1	-1	1	3	1
a_6 (下上中)	1	1	1	-1	1	3

呢？今以一简单的有鞍点的两人零和有限对策的例子来加以说明。如果 A 有三个策略： a_1, a_2, a_3 ； B 也有三个策略： b_1, b_2, b_3 。那么，支付矩阵如下：

局中人 B 支付 局中人 A		b_1	b_2	b_3
a_1		3	-1	-5
a_2		2	1	2
a_3		-1	0	7

如果 A 选择 a_1 ，其支付函数 $[3 - 1 - 5]$ ，倘若 B 事先知道 A 的策略，就会选择 b_3 ，使 A 的支付为 -5 ；如 A 选择 a_2 ，支付函数为 $[2 \ 1 \ 2]$ ，则 B 的最好选择是 b_2 ，此时 A 的支付为 1 ； A 选择 a_3 ，支付函数是 $[-1 \ 0 \ 7]$ ，那么对方选择 b_1 ，就会使 A 的支付为 -1 。

而从 B 考虑，选择 b_1 ，那么支付函数为 $\begin{bmatrix} 3 \\ 2 \\ -1 \end{bmatrix}$ ， A 的最好选择

将是 a_1 ，若 B 选择 b_2 ，支付函数则是 $\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ，这时 A 的最好选择是 a_2 ；若 B 选择 b_3 ，支付矩阵将是 $\begin{bmatrix} -5 \\ 2 \\ 7 \end{bmatrix}$ ， A 必选择 a_3 ，使他

的支付为7。从上面的支付矩阵可以看到，如果 A 选择 a_2 ，不管 B 采取什么策略，他的最坏的支付是1，如对方不明智选择 b_1 和 b_3 ，则 A 可得到2，而其它 a_1 与 a_3 的选择，就有冒损失1、甚至损失5的风险。同样如果 B 选择 b_2 ，不管 A 选择什么策略，损失不会多于1，如 A 选择 a_1 或 a_3 ，则可得1，或成平局。除此以外， B 选择其它任何方案，都可能冒损失3，甚至7的风险，于是 (a_2, b_2) 就称为最佳策略。

综上所述，对策双方都是在考虑对方会设法使自己收益最小，损失最大，为了不冒风险，则须从坏处着眼，尽量争取最好的结局。这种思路，对局中人 A 来讲，首先是在他的每一方案取极小值，即对方案 a_1 有 $\min\{3, -1, -5\} = -5$ ，对方案 a_2 有 $\min\{2, 1, 2\} = 1$ ，对方案 a_3 有 $\min\{-1, 0, 7\} = -1$ 。然后在这些最坏结果中，争取最好的情况，即在这些最小值中取最大者， $\max\{-5, 1, -1\} = 1$ ，它所对应的就是 a_2 方案，对局中人 A 来讲应取 a_2 方案。每一个局中人，不管他选择什么方案，另一局中人总希望使对方的损失最大化，也就是每一个局中人将选择这样的策略，使另一局中人把对方损失最大化的企图最小化。这就是竞争性决策问题的最佳策略准则。^①

① 参见《运筹学浅说》，江苏人民出版社1982年版。

第九章 现代系统理论

在本世纪三四十年代相继出现了贝塔朗菲的一般系统论、维纳的控制论、申农的信息论和屈浦缪勒的系统理论。在这些系统理论的影响下,五十年代出现了现代系统运动。在六、七十年代世界许多国家迎来了系统运动的热潮,而在这一热潮中各种新的系统理论象雨后春笋般地出现在人们的面前^①。下面,我们将简要地介绍贝塔朗菲的一般系统论、普利高津的耗散结构理论、哈肯的协同学、爱根的超循环理论、米勒的生命系统理论、福雷斯特的系统动力学以及邓聚龙的灰色系统理论和吴学谋的泛系理论。

第一节 贝塔朗菲的一般系统论

L.V.贝塔朗菲是理论生物学家、一般系统论的主要创始人,是二十世纪杰出的科学家和哲学家。早在二十年代他提出机体生物学(亦称机体系统理论);1937年他首先从口头上提出一般系统论的基本思想;1945年发表一般系统论的创立宣

① 参看朴昌根:国外系统理论研究(上,中,下);《自然辩证法研究》1988年第1期,第2期,第3期。

言——《关于一般系统论》一文。此后又发表了有关一般系统论的大量论文和一些著作。

贝塔朗菲认为，一般系统论要研究各种系统的一般方面、一致性和同型性，要阐述和导出适用于一般化系统或其子系统的模型、原理和规律。他主要研究了如下三种系统理论：

一、机体系统理论

机体系统理论的提出是与本世纪初在生物学领域中发生的活力论与机械论的斗争紧密联系在一起。机械论者正确地指出为弄清生命现象就必须研究生命现象赖以发生的机械、物理、化学过程。而活力论者也正确地指出生命现象不能归结为机械、物理、化学过程。但是前者未能说明生物体的统一性、秩序、组织和自调节性等，活力论者试图回答这些问题，但不是去推翻机械论的错误，而是从机械论的错误出发；它除了从外部加进一种超自然的活力外什么也没有作，因此活力论只不过是机械论加活力。贝塔朗菲正确地指出：机械论和活力论都建立在分析和相加的观点、机器理论的基础上。

在贝塔朗菲看来，机械论和活力论都没有揭示解决生命本质问题的正确方向。这样，他提出机体系统理论，试图以此解释生命的本质。他的机体论可归纳为如下四点：整体性、动态结构、能动性和组织等级观点。在他看来，首先，生物体是一种开放系统，生命的本质不仅是从生物体各组成成份的相互作用，而且要从生物体与环境的相互作用中说明。生物体是在时空上有限的具有复杂结构的一种自然物整体。从作为一个有机整体的生物体中分割出来的部分截然不同于生物体中起作用的部分；生物

体各部分离开整体是不能存在的；就人而言，肉体和精神有着不可分割的联系。一般地，分离部分的行为不同于整体的行为。其次，生物体结构是一种动态结构，与静态结构（如机器结构、晶体结构）有着本质区别；后者由不变的组成部分构成，前者则以其组成物质的不断变化为自身的存在条件。代谢作用是每一机体的基本特征，而由于代谢，机体的组成要素每时每刻都在发生变化。所以生物体与其说是存在的，不如说是发生的，在生物体中每一层次的存在总是以次级层次的生长、衰老和死亡为前提。动态结构有自调节性，而静态结构只有被动的更换性。第三，生物体不是一个被动系统，它首先是一个能动系统；生物体具有应激性，但其主要特征在于能动性，如心跳、呼吸等生理机能不是对外界刺激的反应，而是维持生存的内在要求的实现。第四，生命问题本质上是组织问题，而生物组织有等级性。所以生命现象必须在生物体组织的所有层次上，即物理化学层次、基因层次、细胞层次、多细胞组织层次、器官层次、个体层次和由许多个体组成的群体层次上加以研究。

贝塔朗菲于 1928 年明确指出：“因为活物的基本特征是组织，对各个部分和各过程进行研究的传统方法不能完整地描述生命现象，这种研究没有向我们提供协调各部分和各过程的信息。因此生物学的主要任务应当是发现在生物系统中（在组织的一切等级上）起作用的规律。”^① 这一思想是一般系统论的萌芽，后来发展成为整个一般系统论的纲领。

① 转引自 Bertalanffy, L. v.: The History and Status of General Systems Theory, In Trends in General Systems Theory, G. J. Klir (Editor), PP.24—25, New York, Wiley, 1972.

二、开放系统理论

传统热力学所研究的是与环境相隔离的系统即封闭系统。但严格地说,封闭系统只不过是开放系统的一种近似,它忽略了环境对系统的作用。在现实性上,系统与环境之间存在着错综复杂的相互作用,存在着物质、能量与信息的流通。例如每个活的机体本质上是一个开放系统,它们在连续不断的吸入和排出中,在不断构成或破坏组成物质的过程中保持它们的生命。活的机体不能处于化学和热力学的平衡态,而是处于所谓稳态之中。显然,研究开放系统要比研究封闭系统复杂得多,但同时又重要得多。

贝塔朗非以极大的兴趣和精力在实验和理论上研究了开放系统理论,试图科学地解释一系列新观点,如稳态(英文为 steady state,相当于贝塔朗非造出的德文词 Fließgleichgewicht,即流动平衡)、等终极性、秩序在开放系统中的可能增加,等等。他认为:开放系统理论,是物理学理论、动力学和热力学的一个重要的扩展;“一为等级组织,另一为开放系统特性,这两者是有生命界的基本原理”,“开放系统理论正象在物理学一样,在生物学也揭开新的篇章”^①。

开放系统理论,是走向研究一般系统的一个重要步骤。一个开放系统,可用普通的输运方程表示。设 Q_i 是系统的第 i 个元素, T_i 是 Q_i 在空间某一点上的输运速度, P_i 是该元素的产生

^① Bertalanffy, L. v.: Problems of Life, pp. 126—127, New York, Wiley, 1952.

速度,那么

$$\frac{\partial Q_i}{\partial t} = T_i + P_i$$

这一方程所示的系统可能有三种不同的解:其一, Q_i 无限增大;其二,系统达到不依赖于时间的状态;其三,系统达到振荡状态。贝塔朗非特别感兴趣的是第二种状态中的稳态。现将有关稳态的主要思想介绍如下。

第一、稳态与平衡态的区别

封闭系统最终要达到平衡态,而开放系统在一定条件下可以达到稳态,在整体上和组成上保持不变。稳态与平衡态都是不依赖于时间的状态,从而两者表现出一些相似之处,但这两者本质上是完全不同的。其一,在稳态和平衡态中,系统的组分比都是保持不变的,但在平衡态中,其组分比是在系统内部物质的运动中保持恒定的;而在稳态中,其组分比是在系统与环境之间发生不断的物质交换的情况下仍然保持不变的。实际上稳态中的组分比只依赖于反应常数,与流入量无关,这说明这种系统具有自调节能力。其二,如同热力学第二定律所示,平衡态建立在封闭系统中,是以可逆反应为基础,由最大熵和最小自由能标征的;但是稳态建立在开放系统中,稳态系统中既有可逆反应又有不可逆反应,整体上是不可逆的。其三,封闭系统中的平衡态,它的维持不需要能量的输入,但也不能从中得到能量。例如,化学平衡,它不是静态,化学反应在不断进行,但不需要为此做功,也无法以此做功。但稳态持有与平衡态的一定距离,所以稳态可以提供能量做功,但为保持与平衡态的一定距离需要不断地吸收能量。

第二、等终极性

在封闭系统中终态是由初态决定的。如在一个化学平衡中，反应物的最终浓度自然要依赖于最初浓度，如初始条件或过程发生变化，那么终态也将发生变化。但在开放系统中，从不同的初态和不同的方式可以达到相同的终态，也就是说，在开放系统中所达到的稳态，不依赖于初态或过程，而只取决于系统参数即反应速度和输运速度，这就是所谓等终极性。这一性质在生物的有机过程中具有特别重要的意义。在海胆实验中我们可以看到由不同的初态达到同一的终态。而由不同的过程也能达到同一的终态，如老鼠从出生后的第五十天起可能因维生素缺乏症而停止成长，但恢复正常的营养后照样可以达到正常的最终体重，在这个例子中，等终极性不仅定性地而且定量地得到了说明。

第三、熵原理的扩展

根据热力学第二定律，在封闭系统中物理化学过程是朝着熵增大即几率增大、有序变小的方向进行的。与此不同，有机体处于高度有序的状态中，甚至可以向不断提高分化和组织程度的方向发展，如同在生物的发生和进化中所看到的那样。普利高津扩展熵原理解释了其中的原因，而贝塔朗菲积极吸取了普利高津的不可逆过程热力学的成果。我们知道，在封闭系统中系统的总熵不断增大而达到最大值。但是在开放系统中，如果熵的输出量大于(或等于)熵的输入量与系统内熵产生的总和，那么系统的总熵就减小(或保持不变)。生物系统的情况就是这样，如同薛定谔所说，生物体是依赖负熵为生的，因此稳态开放系统可以保持其既有秩序或增加其既有秩序。

在贝塔朗菲那里，开放系统理论不仅是一般系统论的重要

渊源之一，而且是一般系统论的重要组成部分之一。现在我们知道，开放系统理论在普利高津的耗散结构理论和哈肯的协同学等理论中获得了巨大发展。但贝塔朗菲在开放系统理论中所得出的不少结论仍未失去其科学价值。这里特别需要指出的是，贝塔朗菲所研究的“开放系统”概念不仅揭开了整个系统研究的序幕，而且已成为整个系统研究的最基本的范畴之一。经典力学和经典数学动力理论实际上只研究系统的状态，但“开放系统”一语即使从词义上也就与三个基本概念即状态、输入和输出联系在一起。其中，状态与系统的结构有关，输入与系统的控制有关，输出与系统的行为有关。这样，由于贝塔朗菲（以及其他一些人）关于开放系统的研究，科学从对系统状态的研究发展到对系统状态、输入与输出的研究。这是一个革命性的转变，又是系统科学的真正开端。

三、动态系统理论

系统根据它的状态与时间的关系可分为静态系统和动态系统。在静态系统中，决定状态特征的状态变量与时间变化无关。但在动态系统中，系统的状态变量是时间的函数。就静态系统和动态系统的关系而言，前者只是后者的一种近似，从本质上看，现实的具体系统都是动态系统，所以把动态系统看作系统的一般模式是正确的，而对动态系统进行一些简化操作就可推出静态系统。

对于动态系统有两种基本的描述方法，即内部描述和外部描述。前者是“结构”描述，后者则是“功能”描述。贝塔朗菲在《关于一般系统论》一文中深入研究了动态系统的基本结构，并

在用联立微分方程进行系统描述的基础上对系统的各种性质(如整体性、加和性、增长、竞争、机械化、集中化、终极性、等终极性等)作了数学描述。

贝塔朗非用下列方程组展开了讨论:

$$\frac{dQ_i}{dt} = f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \dots\dots\dots(1)$$

其中 Q_i 表示要素 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的若干分量。

对此方程的讨论表明, 在不同约束条件下系统就处于三种不同状态: 定态(包括平衡态与稳态)、周期性变化和发散性变化。

系统的整体性在数学上表现为: 每一要素的变化导致其他所有要素和整个系统的变化, 而每一要素的变化依赖于其他所有要素。

为讨论系统的加和性, 先将上述方程展开为泰勒级数, 然后设变量 $Q_j (j \neq i)$ 的系数等于 0, 那么可得

$$\frac{dQ_i}{dt} = a_{i1}Q_i + a_{i11}Q_i^2 + \dots$$

这表明每一要素的变化只取决于它本身, 即整个系统的变化是各独立要素变化的总和。这种行为被称为物理加和性。

数学加和性是指整个系统的变化所遵从的方程在形式上与每一部分的方程相同。这只是在系统方程只含有线性项时才是可能的。

设方程(1)中 Q_i 的系数不是常数, 而是随时间而减小, 即是说要素之间的相互作用随时间而变小, 那么系统从整体性状态过渡到各要素相互独立的状态。在这种系统中, 系统内部的相互作用逐渐分离成独立的因果链, 系统的可调节性变弱, 系统逐

步变得象一部“机器”，即独立部分的总和。这就是渐进分化，亦可称为渐进机械化。

但是，渐进分化不是唯一的过程，它伴随着渐进集中化，而在集中化过程中产生系统的主导部分，它保证系统的整体可调节性，防止系统被溃散为各部分。例如在动物的生长中，早期受精卵相当于一个整体系统，担负生命的全部功能，但在发育过程中逐渐分化出器官复合体、各器官、器官的各部分。这样，动物的整体功能分配给各器官，一器官不能代替另一器官，这是渐进分化和渐进机械化的发展过程。但是这里的分化不是完全的分离，渐进机械化并未达到完全的机械化。动物由于渐进分化和渐进机械化它的整体可调节性减弱，但赖于渐进集中化和主导部分仍然保持其整体性。在高级动物中体液、激素和神经系统起着整体化作用，其中神经系统是主导部分，因为其整合作用主要依赖于神经系统。

系统的终极性也可以用数学形式表示。设方程(1)有定态解 Q_i^* ，并引进一个新变量 $Q_i' = Q_i^* - Q_i$ ，则

$$\frac{dQ_i}{dt} = f_i[(Q_1^* - Q_1'), (Q_2^* - Q_2'), \dots, (Q_n^* - Q_n')]$$

这表明，假如系统接近一个定态，则系统的变化不仅依赖于其现有状态，还依赖于与定态的差距，也就是系统的变化不仅依赖于它的当前状态，还依赖于它必然要达到的终极状态。据此可以说，“事件朝向终态不是与因果性不同的事件，而只是对因果事件的另一种表述。”^① 也就是说，对事件的目的性解释和因果性

① Bertalanffy, L. v., Zu einer allgemeinen Systemlehre, Biologia Generalis, 19(1949).

解释不是对立的，而是统一的。

等终极性被看作是有机调节的基础，但有些无生命系统也具有等终极性。在某些现象中可以用定量方法规定系统的等终极性。例如，有机体内的分解过程取决于其体积大小，而合成过程取决于其表面大小。在生长过程中，表面与体积的比逐渐下降，最后达到合成与分解之间的流动平衡，这种平衡与有机体的原来大小无关，而只取决于合成与分解之比，是等终极的。

从方程(1)中，还可以推出有名的指数增长规律和S型增长规律，又可以推出有名的异速生长方程和洛特卡—沃尔特拉方程，这些数学模型的重要性是众所周知的。

当然，贝塔朗菲关于动态系统理论的数学描述是过于简单的，但是从一组联立微分方程推出系统的各种一般特性，这本身就具有十分重要的认识论意义。一个对象，只要它是一个系统，它就具有一般的系统特性，因而不同的对象虽然其中直接起作用的要素千差万别，但它们的规律在形式上、结构上是可以完全一致的。在科学史上类似的观点和原理经常独立地和基于不同的事实分别在相当不同的领域多次被发现，这是因为一个领域的研究者不了解他所需要的理论结构已在其他领域取得了充分发展。一般系统论的建立就可以使在一个领域发现的规律正确地从这个领域过渡到另外一些领域。

贝塔朗菲在深入研究一般系统的基本性质，为一般系统论建立概念框架的基础上，力求把一般系统论的基本原理应用于物理学、生物学、精神病学和社会科学等领域，试图以一般系统论为基础实现科学的统一。

（朴昌根编写）

第二节 耗散结构理论

耗散结构概念是由比利时布鲁塞尔学派领导人普利高津(I. Prigogine)教授于1969年在“理论物理与生物学”国际会议上首次提出来的。所谓耗散结构,是指一个远离平衡态的开放系统(力学的、物理学的、化学的、生物的,以至社会性的、经济性的系统等),通过不断地与外界交换物质与能量,在外界条件的变化达到一定阈值时,能从原来的无序状态转变为在时间上、空间上或功能上的有序状态,当外参量继续改变时,还会出现一系列新的结构状态。这种在远离平衡态情况下所形成的新的有序结构,称为“耗散结构”。而研究耗散结构的性质,它的形成,稳定和演变的规律的科学,称为耗散结构理论。

按以往经典热力学的描述,平衡是无序的高熵态,在时间上是单向性的,即随时间的推移,孤立系统的熵将达到最大值。在孤立系中,一切演化过程都趋向于同一中心,即终极平衡态。因而经典热力学描述是不能用于解释生物的、社会的演化问题的。

十九世纪以来,生物学已发现了生物进化规律和人类社会发展规律,这是无法用传统热力学加以解释的。因为这类系统不同于如晶体结构这类被通常认为是静态的、封闭的结构系统。而是与一定的活动,一定的物质交换或能量交换紧紧联系在一起,非平衡态不可逆热力学的新研究领域也正是面对这些问题开始的。从1946年到1967年整整二十年中,普利高津学派把物理系统或生物系统的有序结构形成的条件当作一个新的方向

展开理论探索，并且把重点放在新结构的产生是否与平衡中心的距离有关这一问题上。他们终于发现，在远离平衡态区，能够出现新的结构，但这是与静态有序的平衡结构完全不同的一种动态稳定的有序结构，即耗散结构。他们的主要理论观点与方法可以概括为下列三个方面。

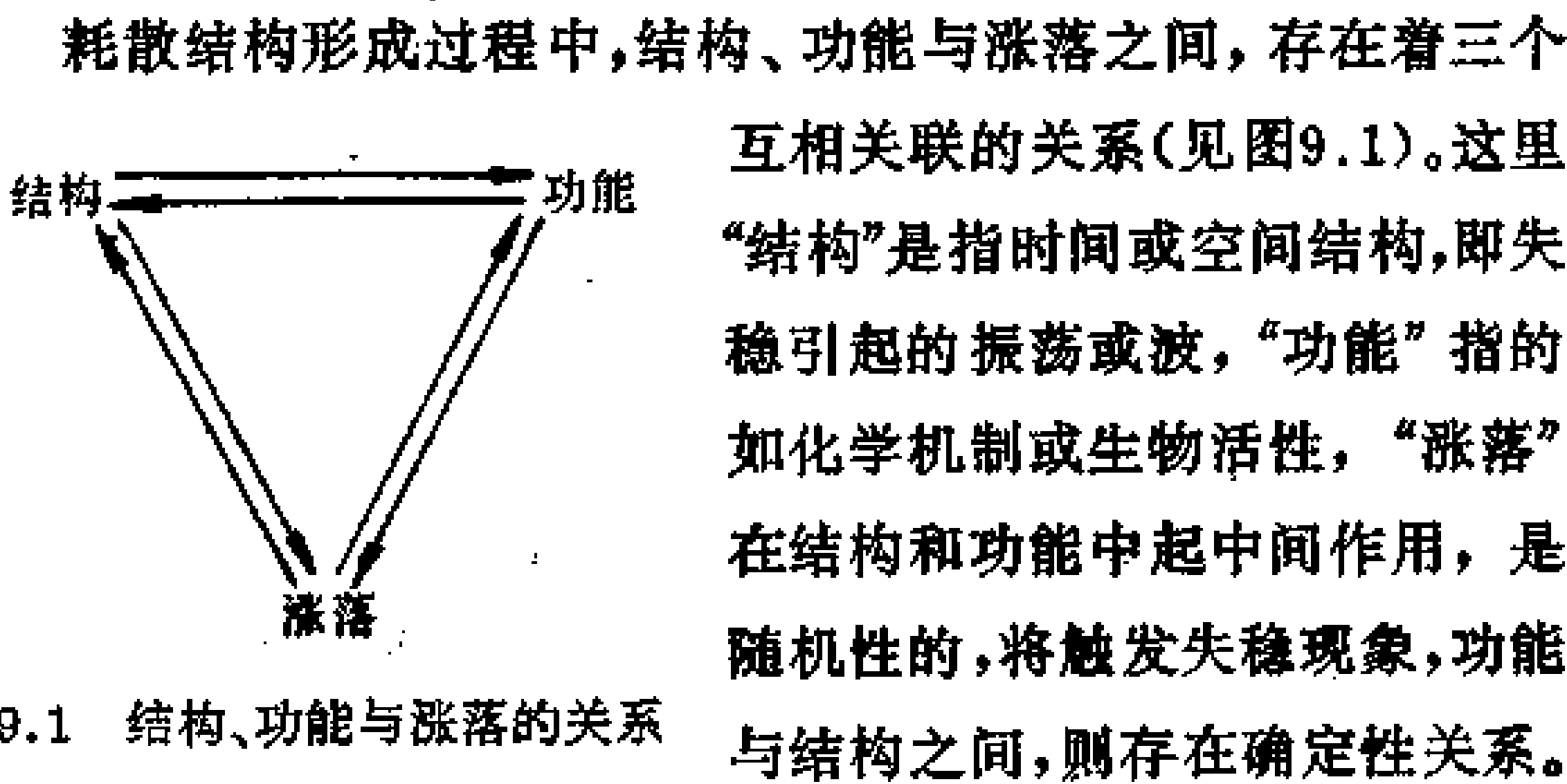
第一，提出了描述耗散结构形成的条件和特征的新科学概念和思路。

耗散结构理论的研究对象只能是开放系统。因为“耗散结构”只有通过外界交换能量(和物质)才能维持。普利高津学派通过热扩散电流为例说明了这一观点。因为在热扩散电流中，其浓度梯度正是由能量流维持着。在热交换中，情况也一样，随着温度的增大，有序化逐渐出现。再以城市结构为例，维持城市的前提是必须有人和货物流入城市，即是说，一个“活”的城市结构，必须不间断地进行着与周围环境之间的物质、能量和信息的交换，一旦这种交换停止，也就变成了死寂的城市结构，失去了城市的意义。生命结构所以能维持，也正在于不断地与外界环境进行物质、能量和信息的新陈代谢。所以耗散结构研究的对象，只能是开放系统。

耗散结构只能在远离平衡条件下才能出现。在非线性的远离平衡态达到一定阈值以后，系统稳定平衡的条件不能得到满足，变得不稳定，正是在这种条件下，在不稳定性的基础上，系统会“自己组织起来”，产生一种新的结构。流体力学中的贝纳德花纹就是典型的例子。这个例子说明，只有在系统远离平衡态，又存在能量交换的条件下，才有可能出现新结构。而且，如果能量供给过小，温度梯度小于某一特征值时，对流花纹也会自行消

失,回复流体原先的定态。

耗散结构形成的另一依赖条件是非线性的反常涨落。普利高津认为涨落是形成新的系统结构的原因。虽然在靠近平衡态的附近也存在着微涨落,但那种涨落由于是靠近平衡态,只能是对平均值的小小修正,并很容易趋于衰减和消失。在远离平衡条件下当涨落趋向某一特征值即质变关节点时,不稳定点附近的涨落将出现反常,最初在小范围内,以后在大范围内以至整个系统都变样,局部质变的扩大引起整体质变的出现,此时的涨落驱动了平均值,使它由一种状态变为一种新态。即涨落也达到足以显示宏观效应,即出现宏观涨落。并且由于系统没有中断地与外界进行能量交换的结果,宏观涨落被稳定下来,这就是通过涨落而达到的有序,也即由于耗散结构的形成而表现出来的有序性。



概括地说,只有开放系统,远离平衡和存在反常涨落的条件下,才有可能出现耗散结构,这既是耗散结构的存在条件,也是它的基本特征。正如普利高津指出的,“我们今天知道,不可逆性可能是有序的源泉,相干的源泉,组织的源泉。”或者可以

说,“非平衡是有序之源”这一新观点,成为普利高津学派从事研究的一个基本出发点和新思路。而非线性、不稳定性、涨落这些概念,成为描述和处理耗散结构的出现与进化的最基本概念。

第二,耗散结构形成的物理化学机理分析。

布鲁塞尔学派把引起系统处于非平衡状态的机理分析概括为扩散和化学反应两种过程。热传导、电传导、物质扩散等属扩散型;而化学反应、热核反应、光合作用等属于化学反应型。热传导与物质扩散等一类物理现象在远离平衡态之下,与平衡结构完全不同,耗散结构可以具有包含大量个体协作的相干状态,而导致一个从无序到有序的转变,这可能是物质的新力学态的开始,是给定系统与周围环境相互作用的新变化,并且往往会有令人意想不到的现象出现。通常我们考察地球重力场效应时总是要从地面走到高山顶上才会觉察到它的变化。在几个毫米量级的非常小的距离内,重力效应变化实际极小而被忽略,在热扩散中,又被热的涨落所冲掉。然而在不可逆的情况下,这样弱的重力却能够得出新的令人惊奇的效应。例如贝纳德不稳定所形成的贝纳德层的厚度可以仅仅几个毫米,这是非平衡态下出现的重力场“放大”效应。如果从化学反应的角度出发考察建造复杂系统结构的规律性,则远离平衡地方出现化学钟就是一个典型事例。化学钟是以相干的、有节奏的形式进行的化学反应。如丙二酸在催化剂铈($\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 氧化还原偶以硫酸盐形式加在溶液中)作用下被溴酸氧化的化学反应(Belousov-Zhabtinski 反应),在外加物的一定浓度范围内,会出现浓度随时间周期性改变的化学振荡,周期为 30 秒,可持续 50 分钟之久,这是一种时间性的耗散结构。在这种化学钟里,一切分子都在有规则的时间性的耗散结构。

间间隔内同时改变了它们的化学同一性。如果可以把这些分子想象为蓝色的或是红色的,则可以看到,这些分子的颜色随着化学钟反应的节奏而变化。而耗散结构只能在非线性因素相干作用下出现,这在化学反应中是普遍的。化学反应总是粒子间的碰撞引起的,因此它的基本规律永远是非线性的。

第三,耗散结构的基本研究方法。

普利高津建立非平衡热力学的研究方法中运用了局域平衡假设,连续介质力学的描述,李雅普诺夫关于稳定性的理论和分支数学理论等,并推广应用了爱因斯坦的涨落理论。这些假设和理论的综合而形成耗散结构研究的基本方法。

局域平衡假设原是连续介质力学和平衡态统计力学采用过的研究方法,其基本思想是把非平衡系统可看作由无限多的平衡的子系统所构成。这样,就可以用经典力学的方法来描述,对于整个体系来说,就可用局域熵的算术和(若把众多局域看作连续变化,就可用积分代替求和)来描述。而连续介质力学从狭义角度说是指流体力学,布鲁塞尔学派把非平衡体系的不可逆过程近似地看作一种类似流体的连续变化系统,就可以借用连续介质力学的成果来建立平衡方程或扩散反应方程以描述非平衡态的不可逆过程。

李雅普诺夫方法是不用解析或数值的分析计算整个系统稳定性仅有的普遍方法。为了要判别稳定化的耗散结构在什么条件下才出现,因而布鲁塞尔学派在建立起体系的扩散反应方程之后,利用了李雅普诺夫等建立的稳定性理论去得出稳定化耗散结构可能出现的结论。

在研究耗散结构过程中,普利高津他们还充分应用了分支

数学理论和随机数学理论。这是由于涨落总是导致在远离平衡处出现的耗散结构存在一系列多级的分支点，离开平衡态在第一个分支点上，导致轴对称。当系统被驱使更加远离平衡态的时候，一个解可以分支成几个可能的解，当进一步远离平衡时，这个分支的每一个仍可以再进行分支。这种类型的行为由所谓“分歧”或“突变”的数学来描述。1972年托姆(Thom)称之为“混沌数学”。分支点概念可以简单用图9.2表示；

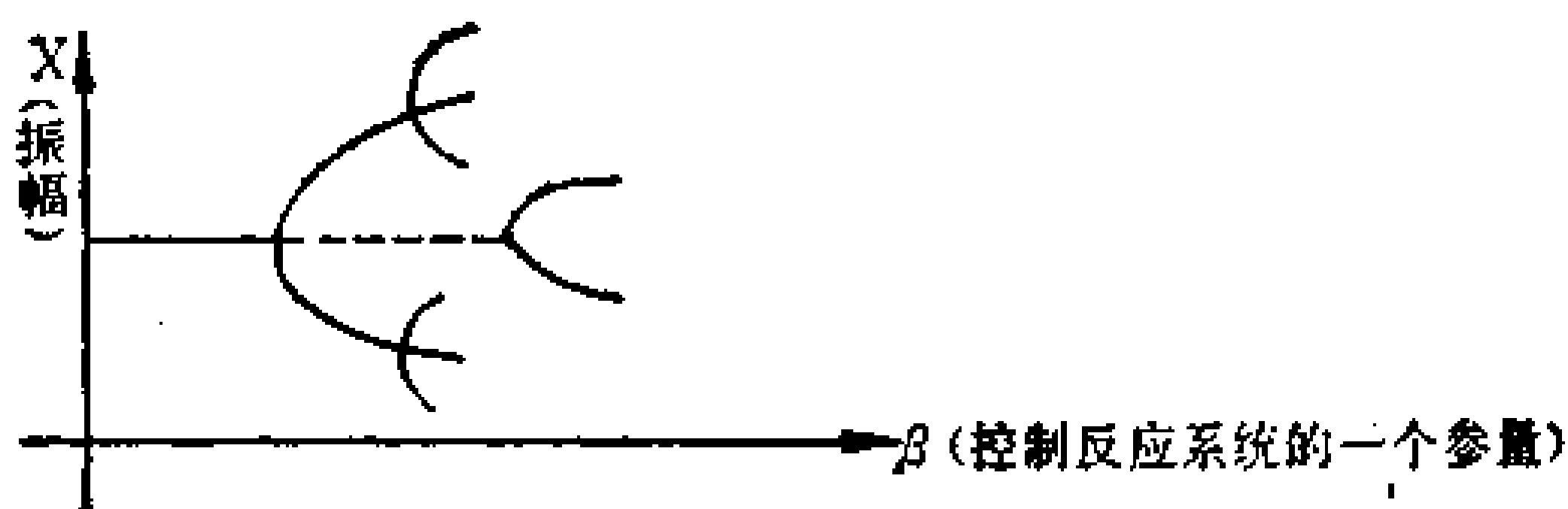


图9.2 多级分支图

图中 X 可以是化学反应中某种组分的浓度， β 是控制反应系统的某个参量，当 β 达到某些特定值时， X 原来的值不再对应稳定态，出现了新的可能性。随着一个接一个新结构的出现，时间和结构概念都得改变。在分支点之前，系统处于靠近平衡的状态，与平衡态相象。在分支点之后，出现新的结构，而在分支点附近，系统有几种状态可选择，确定性的宏观描述在这里不能起作用，而非线性远离平衡的新涨落理论则能够指出这一点，统计描述才显示了作用。

现在普利高津自己把耗散结构理论称作自组织理论，已广泛应用于如介质力学、凝聚态物理学(激光)、化学、地质科学、地球物理、天体物理等许多科学领域，特别是生物领域更是最有希望的应用对象，耗散结构理论也开始应用于分析湍流问题。当

代科学正处于概念重建时期，正如普利高津说的，“我们正是站在一个新的综合、新的自然观念的起点上。”尽管当前耗散结构理论还有一些未能完全解释的领域，如低温等离子体情况下的规律性尚不能用耗散结构理论所说明，这正说明耗散结构理论仍处于发展之中，并不会降低它的意义。（黄麟维编写）

第三节 超循环理论

M.爱根是物理化学家，由于他在高速化学反应方面的工作，1967年获诺贝尔化学奖。他于1971年提出超循环理论，于1977年发表《超循环——自然界的一个自组织原理》一文，系统地阐述了超循环理论。这一理论属于分子生物学及分子生物物理学领域。

爱根认为，在逻辑上可以把进化分为在时间上并非截然分开的三个时期：第一是前生物的化学进化阶段，在这里无机分子逐步进化为简单有机分子，简单有机分子又逐步进化为复杂的有机分子，最后产生核酸和蛋白质；第二是生物大分子的自组织阶段，即从无生命到生命的进化阶段，在这里通过核酸和蛋白质的相互作用最终产生最早的原生细胞；第三是达尔文生物进化阶段，这里原生细胞逐步进化而产生各种生物种。奥巴林已在原则上解决了从无机物到有机物的进化问题，而达尔文及现代达尔文主义者已从原则上解决了物种进化问题。爱根所提出并要解决的是从无生命到生命的进化即从生物大分子到原生细胞的进化问题。为此，爱根引入所谓“超循环”概念。

爱根把循环反应网络分成三个等级，如图9.3所示。

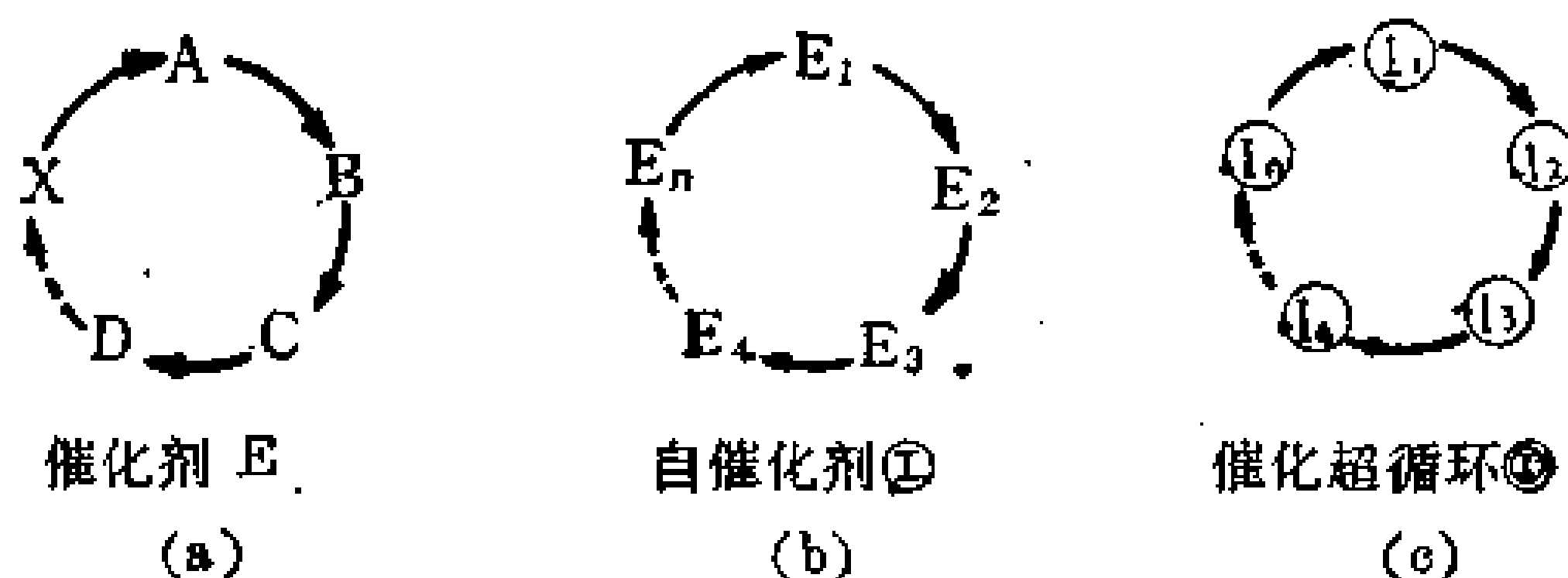


图 9.3 循环反应网络的三个等级

第一等级是反应循环。在一组相互关联的反应中，如果任一产物与前面某一步骤中的反应物相同，就形成一个反应循环，而反应循环作为整体就成为一个催化剂，如图 9.3(a)所示。在最简单的情形中，酶就是这样的催化剂。它使底物 S 转化为产物 P ：



这一反应的实际过程是，酶 E 与 S 先结合成 ES ， ES 再转变成 EP ， EP 又释放出 P 和 E ，而 E 再与 S 结合，以此构成反应循环。

第二等级是催化循环。如果一个反应循环中至少有一个中间物（也可以是全部中间物）是催化剂，就形成一个催化循环。如在图 9.3(b) 中， E_1 是 E_{n+1} 的催化剂，而循环 $E_1 \rightarrow E_2 \rightarrow E_3 \rightarrow E_4 \rightarrow E_1$ 作为整体就是一个自催化剂。催化循环可表示为



其中 X 为富能构筑材料。最简单的催化循环成为一个自复制单元，是为保存信息所需要的。单链 RNA 的复制，是一个生物学上重要的催化循环。正链 RNA 可以作为模板，指导负链 RNA

的合成，而负链 RNA 也可以作为模板，指导正链 RNA 的合成。双链 DNA 的自复制是一个在生物学上典型的催化循环。

第三等级是催化超循环。严格地从字面上说，自催化系统已可称为超循环系统，因为自催化系统是催化循环，而催化剂本身是反应循环。但在爱根的理论中所谓超循环是指关于催化功能是超循环的系统，即催化超循环，而不是指由反应循环组成的循环。因此催化超循环是以循环联系连接各个自催化剂或自复制单元而形成的。如在图 9.3(c) 中，各中间物本身是自复制单元。其中各个 I_i 具有双重循环功能，它既能指导自己的复制，又能为下一个中间物的产生提供催化支持。例如，在 DNA 噬菌体感染细菌细胞的反应中就包含一个超循环过程，可简化表示为 $\textcircled{I} \rightarrow \textcircled{E}$ 。

爱根进一步考虑生物大分子的自组织过程。他认为，从生物大分子的水平上看，选择与进化的基础是代谢、自复制和突变。代谢是生命现象的一个基本特征，选择只有对处于代谢过程中的分子种才有意义。

自复制是为保存信息所必需的。非耦合的自复制单元已可以保证从一代传至下一代的有限信息量的保存。而超循环事实上是确保功能上相关联的一些自复制单元所能共存的最简单的实际分子组织，是使可以自复制的功能联系能够进化的最简单系统。它能够从一个自复制单元和它的突变种中，亦即从一个单一的(分子)拟种中起源。无论何时何地，只要自然界所设置的环境条件许可，它的出现是不可避免的，并且一旦建立就永存下去。

突变是在自复制过程中出现的。复制错误会产生新的信

息,产生新的突变种,从而破坏原先的稳定分布,导致不稳定,而新的稳定形式只有在这种不稳定性基础上才能建立起来。

爱根为生物大分子的进化提出了数学模型:

$$\dot{x}_i = (A_i Q_i - D_i) x_i + \sum_{k \neq i} v_{ik} x_k + \Phi_i$$

其中, $i = 1, 2, \dots, n$, 是程序指标, 取决于一切可辨别的自复制分子单元, 从而表征它们的特殊遗传信息; x_i 是分子种 i 的种群量; $A_i Q_i x_i$ 表示种 i 以自己为模板的合成速率; $-D_i x_i$ 为分解速率; 质量因子 Q_i 表示种 i 正确复制的比例, 取 0 与 1 之间的值; $v_{ik} x_k (k \neq i)$ 表示由种 k 的错误拷贝产生种 i 的速率; 流 $\Phi_i = \Phi_i x_i / \sum_k x_k$, 调节总流 Φ_i 可使 $\sum_k x_k = c$ (常数)。通过对此方程的讨论, 爱根认为选择的对象不是单一的分子种, 而是拟种, 即按一定概率分布组织起来的一些关系较密切的分子种的组合。

爱根用图 9·4 与图 9·5 说明超循环的进化原理。在图 9·3 中, 对它们自己的复制酶 E_1 和 E_2 进行编码的两个突变种基因 I_1 和 I_2 可能由于它们的密切亲缘关系而对自强化 [11, 22] 和互强化 [21, 12] 显示出等价偶联。但是在通常情况下, 两个蛋白质未必同样好地识别两个序列, 并且又完全不去识别不相联系的序列, 所以偶联强度会有所差别。在图 9·5 中用线条的粗细表示这些差别, 其中粗线表示偶联中的偏爱 (不管它可能是多么小)。这里有四种情况:

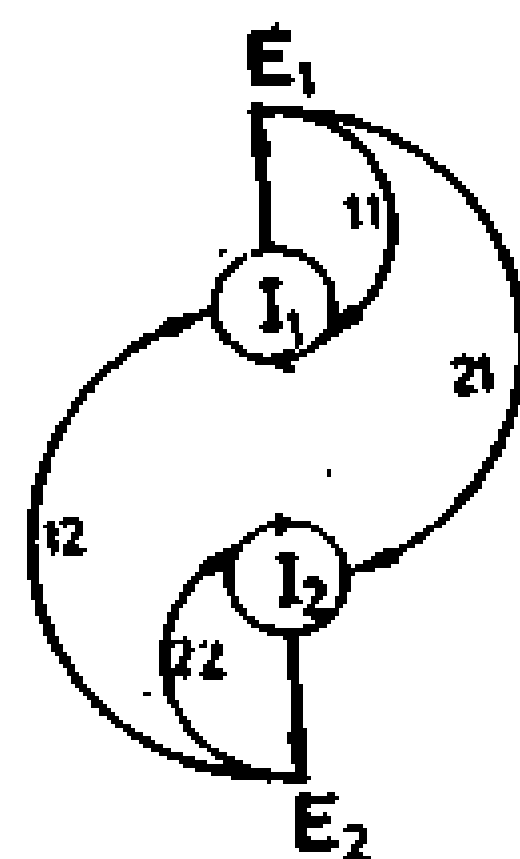


图 9·4 突变种基因 I_1 与 I_2 的等价偶联

(a) E_1 偏爱 I_1 , E_2 偏爱 I_2 。结果, I_1 和 I_2 分别被它们各自的酶以超循环方式强化, 从而导致激烈的竞争。即使这两者

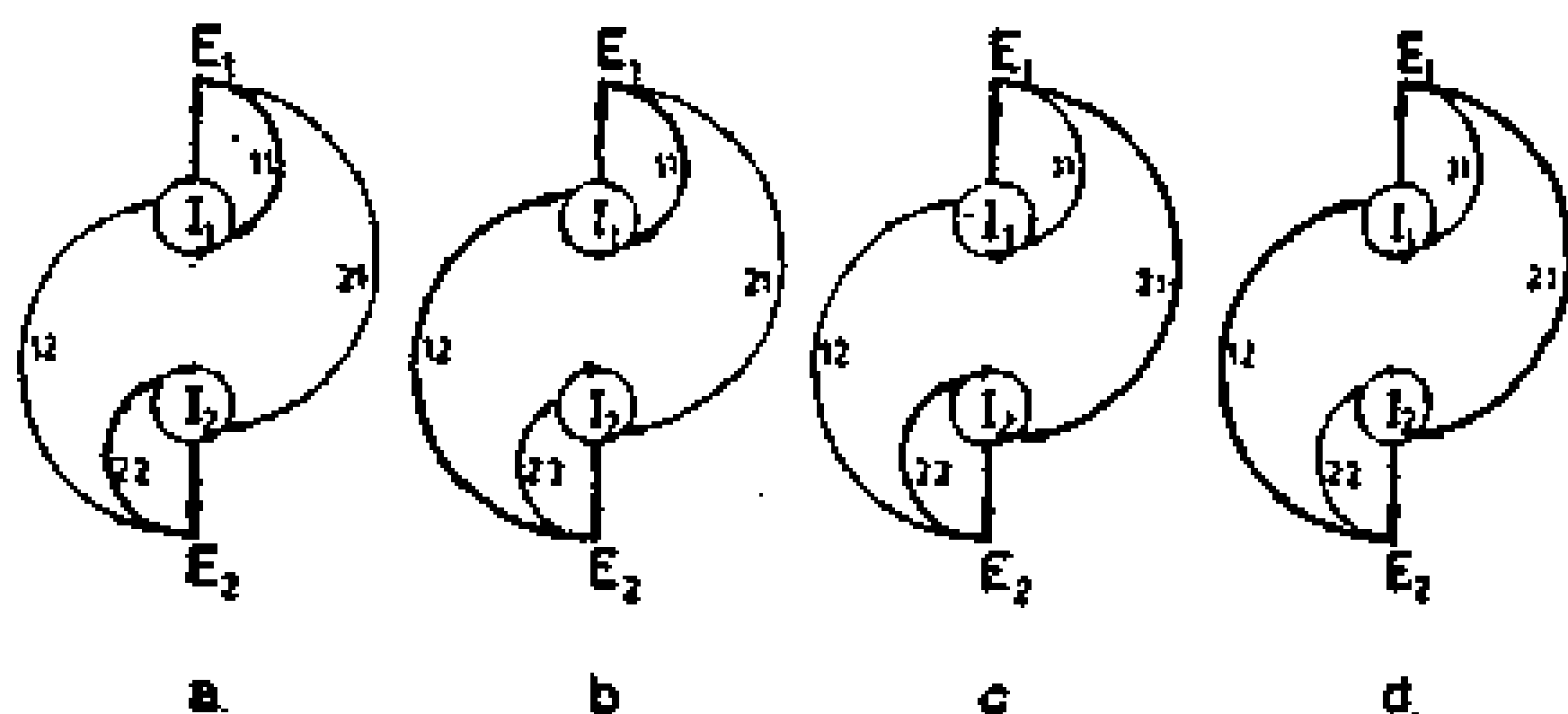


图 9.5 超循环的进化原理

在选择上等价时也由于微小涨落的影响而只有一个突变种幸存下来。

(b) E_1 和 E_2 都偏爱 I_1 。结果, I_1 在竞争中取胜, I_2 消亡。

(c) E_1 和 E_2 都偏爱 I_2 。结果, I_2 在竞争中取胜, I_1 消灭。

(d) E_1 偏爱 I_2 , E_2 偏爱 I_1 。结果, I_1 和 I_2 通过超循环联系而稳定地共存。可见, 一个稳定的二元超循环要求对互强化的偏爱。

爱根用不动点分析方法, 为这里的二元超循环的形成给出精确判据。他利用简化的速率方程

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1,2} k_{ik} x_i x_k - \frac{x_i}{c} \sum_{l=1,2} \sum_{m=1,2} k_{lm} x_l x_m$$

$$i=1, 2; x_1 + x_2 = c$$

由此得三个不动点和它们的本征值:

$$\bar{x}_1 = (c, 0); \omega^{(1)} = (k_{21} - k_{11})c$$

$$\bar{x}_2 = (0, c); \omega^{(2)} = (k_{12} - k_{22})c$$

$$\bar{x}_3 = (k_{22} - k_{12}, k_{11} - k_{21}) \frac{c}{k_{11} - k_{21} + k_{22} - k_{12}};$$

$$\omega^{(3)} = \frac{(k_{11} - k_{21})(k_{22} - k_{12})}{k_{11} - k_{21} + k_{22} - k_{12}} c$$

可以区别下列四种情形:

- (a) $k_{11} > k_{21}; k_{22} > k_{12}$ I_1 和 I_2 相互竞争;
- (b) $k_{11} > k_{21}; k_{22} < k_{12}$ I_1 被选择;
- (c) $k_{11} < k_{21}; k_{22} > k_{12}$ I_2 被选择;
- (d) $k_{11} < k_{21}; k_{22} < k_{12}$ I_1 和 I_2 的超循环稳定。

这些结果还可以推广到多元超循环中去。这样,我们就可以知道,无论在什么时候,只要各组成成分之间出现对互强化的偏爱,就能从一个单一的拟种中产生超循环组织。并且这个超循环组织可以向更复杂的超循环组织发展,例如从 n 元超循环组织发展到 $(n+1)$ 元超循环组织。

最后,爱根把从无生命到生命的进化过程分为如下几个阶段。

(1) 大分子的第一次出现是由其结构的稳定性和组成部分的化学丰度所支配的。在很早的阶段,一定存在着许多不确定的类似于蛋白质的物质和数量少得多的类似于 RNA 的聚合物。但是这些聚合物具有复制它们自己的性质,而这是系统性进化所必需的先决条件之一。

(2) 最初的多核苷酸的合成也是由化学丰度所支配的。早期核酸决不是同类大分子,其中包括 L 型和 D 型化合物以及各种酯键。序列的复制率取决于复制的忠实性。富 GC 的化合物能形成最长的可复制序列。另一方面, AU 取代作用也是必需的。它们引起结构的灵活性,这种灵活性有利于快速复制。可

复制序列形成一种拟种分布,而这种分布展现出达尔文行为。

(3) 这种拟种分布中的连续模式合格地充当信使,而且有外露互补模式的链(可能是信使的负链)代表适合的配接器。最初的氨基酸据其有用性被指定给配接器。转译产物主要由甘氨酸和丙氨酸残基组成,因而显得单调。那些未被引导的蛋白质也是如此。

(4) 如果这些可能的转译产物中的任何一个对于其信使的复制提供催化支持,那么这一受支持的信使就可能在拟种分布中占优势,而这些信使和与它密切关联的突变种将以巨大丰度出现。这一过程可能由一些未被引导的周围的蛋白质所触发。这些蛋白质在其组成上反映了氨基酸的相对丰度,因而可能与原始的被引导的蛋白质有极为相似的性质。

(5) 根据超循环进化的准则,不论什么时候,只要为占优势信使的突变种提供进一步的有利条件,它们就可能被结合到这个复制循环之内。于是由几个密码子指派的超循环组织就可以建立起来。这样一个超循环组织是翻译机构相干进化的先决条件之一。越来越多的突变体被结合起来,而稳定增长的保真度将使这些序列得以延伸。不同的酶功能(复制酶、合成酶、核糖体因子)可能借助基因复制从共同的前提中形成,之后再彼此分离。各单元含有几个结构基因,这些基因是由一个偶联因子共同控制的。

(6) 复杂的超循环组织只有有效地利用有利的表型变化才能进一步进化。为了在选择上有利于相应的基因型,空间的分隔(不论按区域化还是按复合结构)是必需的,而且空间的分隔能够使选择在几种可供选择的突变种组合中进行。在核糖体中

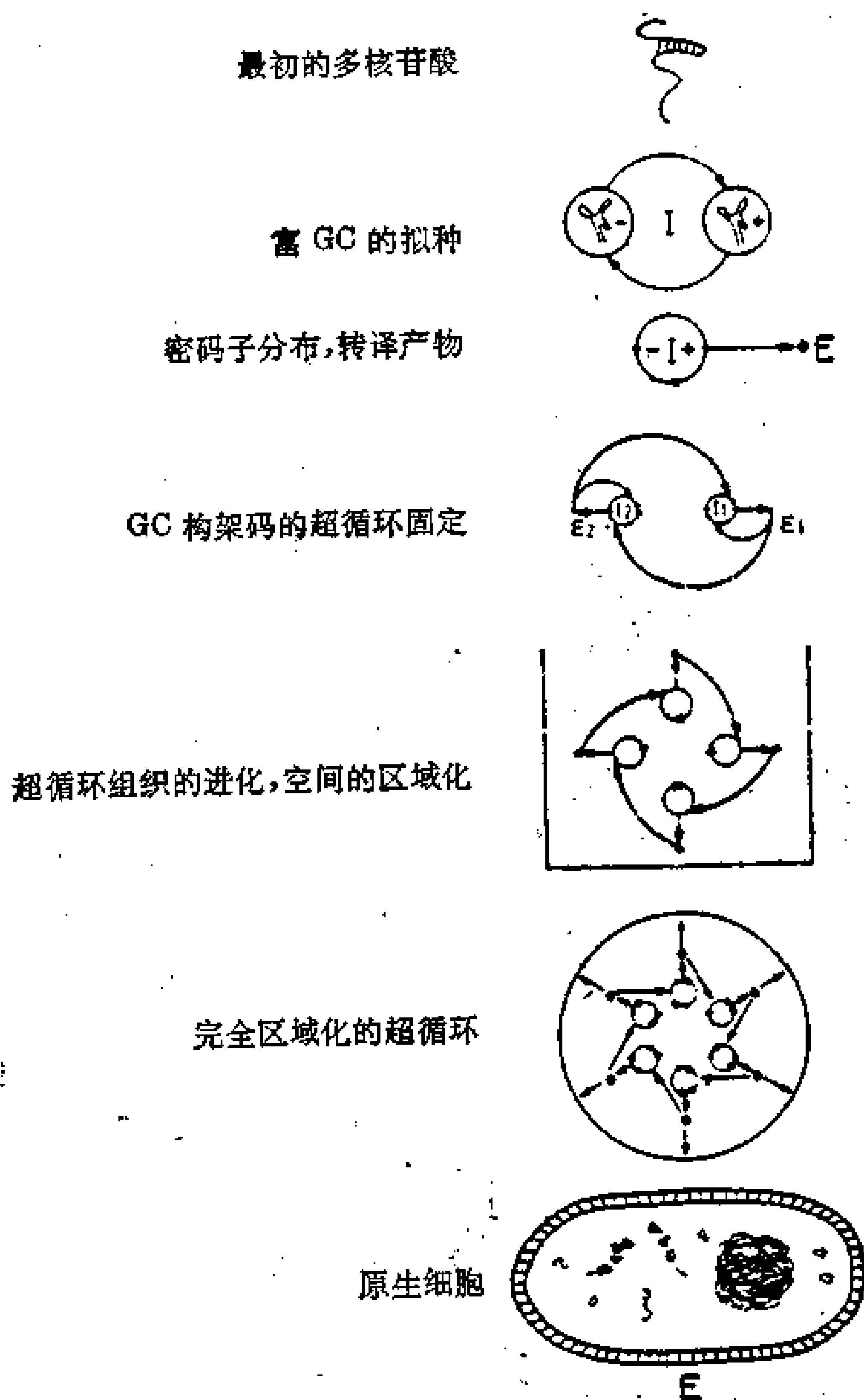


图 9.6 从单一大分子到原生细胞

可能残留着一些复合结构。

这一整个进化过程如图 9.6 所示。 (朴昌根编写)

第四节 系统动力学

系统动力学,是为解决现代科技、经济、社会、环境等复杂的大系统决策问题而创立的关于电子计算机仿真实验技术的方法论学科。自从 1956 年美国麻省理工学院教授福雷斯特 (Jay W. Forrester) 首次创立这一方法以来,它已成功地应用于企业级、城市级、地区级、国家级和世界级的战略与决策实验,被誉为“战略与决策实验室”。

系统动力学以传统的管理方式为背景,以现实的世界为研究对象,引进信息反馈的原理,把复杂多变的社会现象流体化,从而获得了象流体力学那样描述社会系统结构的一般原理和方法,并通过电子计算机的强大记忆能力和高速运算能力,跟踪现实社会系统的发展变化,对其进行可重复的仿真实验,以便认识和掌握社会现象的运动规律。系统动力学不是追求以抽象理论为前提的最优解,而是以观测数据和仿真实验来寻求改善现实世界系统的功能的机会与途径,为解决复杂的社会问题,提供了有效的方法和工具。

一、系统动力学的基本概念

系统动力学有一套自己独特的概念和语言。掌握这些概念和语言,才能有效地理解和运用系统动力学的原理和方法,并把它的数学方程转译为能被计算机“看懂”的语言,才能在计算机

上进行仿真运算。

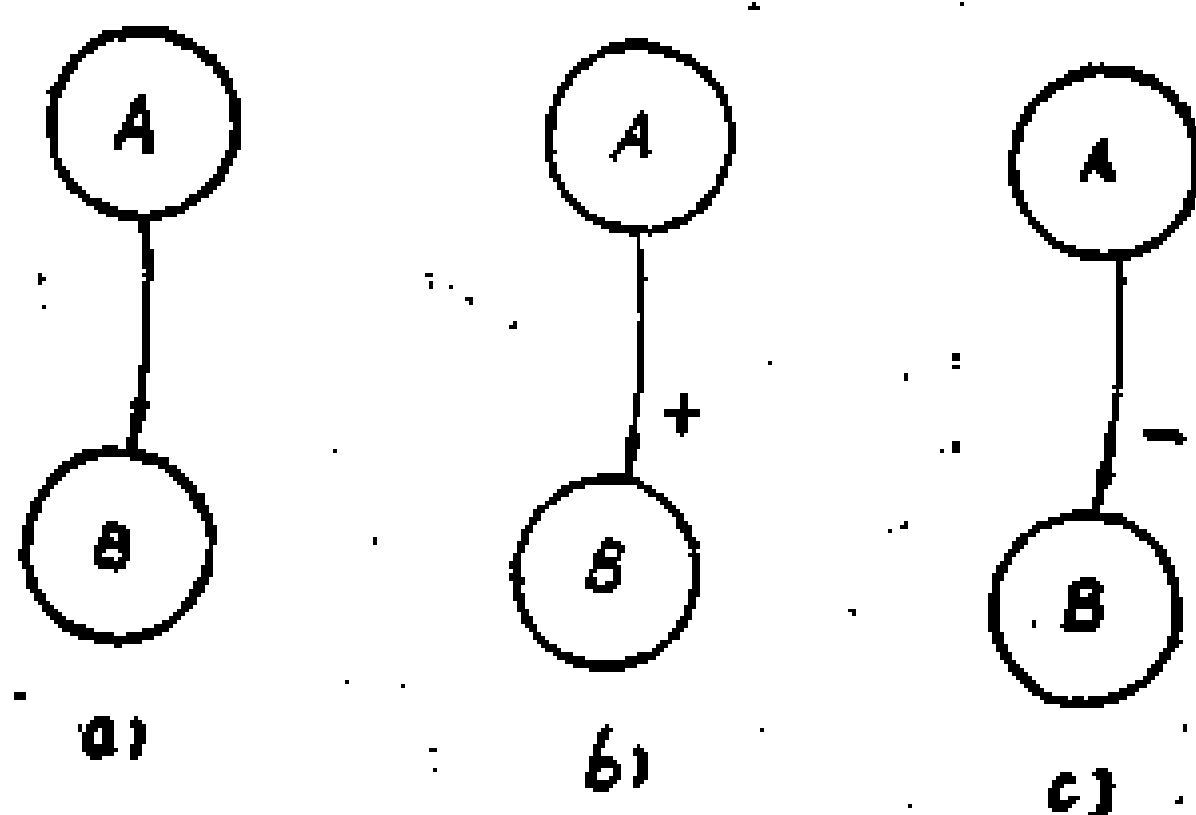


图 9.7 因果关系图

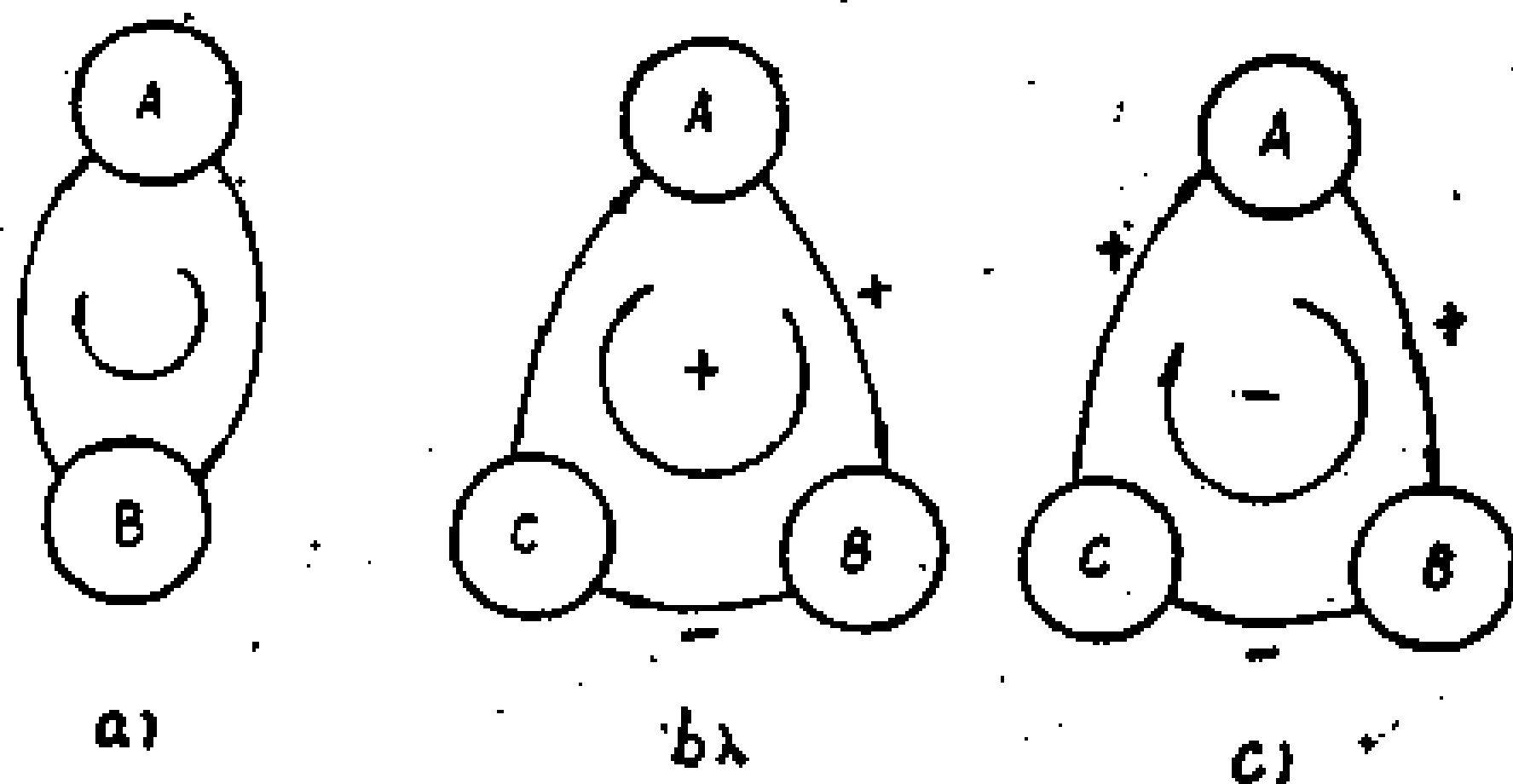


图 9.8 反馈回路示意图

1. 反馈回路(Feedback Loop)

社会系统的事物都是符合因果关系的,有原因必有结果,有结果必有原因。因此,社会系统的事物联系,可以用因果关系来描述。这种描述既简单又明确,它为我们分析社会大系统提供了科学的思路和方法。如图 9.7 所示;如果事件 A(原因),引起了事件 B(结果),那么事件 A 和事件 B 之间就构成了因果关系(图 9.7,a)。AB 之间的箭头表示因果联系的方向。如果事件 A 量的增加引起了事件 B 量的增加,则 A、B 之间构成了正因果

关系,用符号“+”来表示(图 9.7,b);反之,A、B 之间就是负因果关系,用符号“-”来表示(图 9.7,c)。如图 9.8 所示:由两个以上因果关系链首尾串联,就构成了因果反馈回路(图 9.8,a)。这是由两个互为因果的事件构成的反馈回路。图 9.8,b 是由三个互为因果关系的事件构成的反馈回路,即由一个正因果关系和两个负因果关系构成的反馈回路。当 A 增加→B 增加→C 减少→A 增加,也就是说,在反馈回路中任何一个变量的增加,经过反馈回路的作用,会引起自身同一方向变动趋势的加强。这样的回路我们称之为正反馈回路,它会自我强化变动的效果,使这个系统处于不稳定的状态。图 9.8,c 也是由三个事件构成的反馈回路,当其中任何一个事件的量增加,经过反馈回路的作用,会引起自身向同一方向变动趋势减弱,使系统自身有自我调节的能力而使其处于稳定的状态,这样的回路我们称之为负反馈回路。社会系统通常是由许多正、负反馈回路相互联接而形成的复杂结构的综合体。由于系统内存在着正反馈的自我强化作用和负反馈的自我调节作用不完全相等,因而从总体上看,系统就有“稳定”和“不稳定”之分。不稳定系统会呈现出持续“增长”或持续“衰退”的特征。呈现出波动现象或振荡现象的系统,正是由于系统内正反馈和负反馈的回路相互矛盾、相互斗争的外在体现。

2. 积累(Level)和流速(rate)

系统动力学所研究的社会系统的状态,可以由许多参量来描述。在不同性质的系统中人们所感兴趣的描述参量往往是不相同的。例如,对于一个养鱼池系统,人们对于每时刻各个鱼的具体位置并不关心,而对于每个时期大鱼、中等鱼和小鱼各有多少

尾数比较关心。又如经济学家关心市场的各类商品价格和供求关系，而不太关心每种商品的具体来源等问题。一个系统的状态随时间而变动，在状态空间可以用一条线来描述，因而可以把系统状态的变化，形象地看作是一种流。系统动力学通过对于流的研究来掌握系统的性质和运动规律。在系统动力学中，描述社会系统运动变化的主要有四种流：一是物流，如原料、材料、半成品、成品、劳动力、固定资产、自然资源、能源等；二是订货流，如商品定货量、人才需求量、用地需要量等；三是资金流，即现金、存款、货币流动等；四是信息流，如技术专利、情报资料、科研成果等。

积累是系统内部流的堆积量，是用来描述系统状态的概念，如企业中的产品库存量、社会的总人口数、银行的存款等，都是流的积累。系统中某一时间间隔内积累的增量，等于同一时间间隔内输入流量和输出流量之差。凡是在系统内可以用流的概念来描述的状态变化，都存在着积累。除了物流的积累之外，在信息网络中还存在信息的积累。

流速，是系统中单位时间内通过的流量，它表明流的活动状态，也叫做决策函数。积累表示流动的结果，而流速则表示流动自身的状态。如商品的入库流速，是单位时间内入库的商品量。当系统的流速发生变化时，则系统原来的平衡状态就被打破了，这时系统各种流的积累也会相应发生变化。促使系统流速发生变化的原因，可能来自系统外部因素的干扰，也可能来自系统内部积累信息所确定的输出流速的变化。有些系统在打破平衡状态之后，输入流速和输出流速会自行调节趋于新的平衡状态。

系统的流动网络就是由流的积累、流速、信息相互构成的。

这些概念是从现实社会中抽象出来的。复杂的企业模型、行业模型、区域经济模型等都可以通过系统的流动网络勾划出来。一旦把流动网络关系加以定量化的描述,就变成系统流的函数关系了。

系统的任何决策过程,都可以用流的反馈回路来表示(见图 9·9)。决策是根据系统状态信息所作出的控制行为。决策的反馈回路事实上就是连接决策(流速)、积累、行动、信息的完整过程。

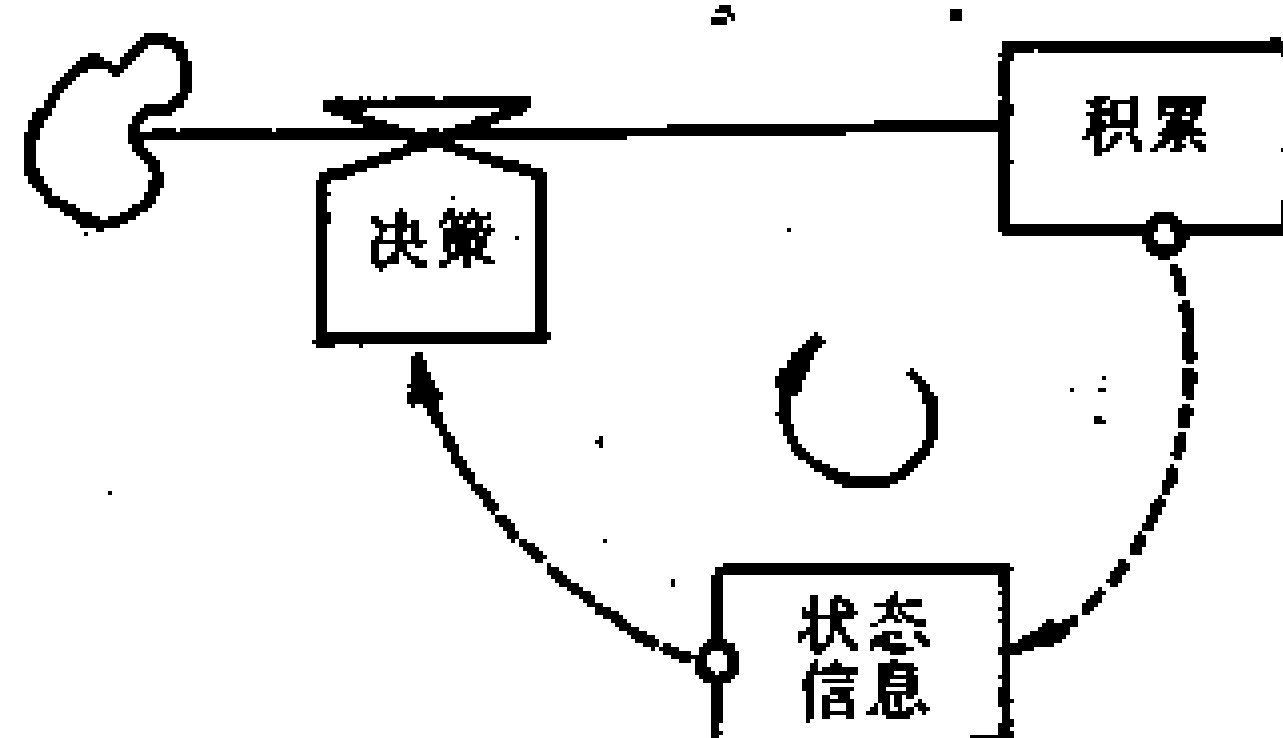
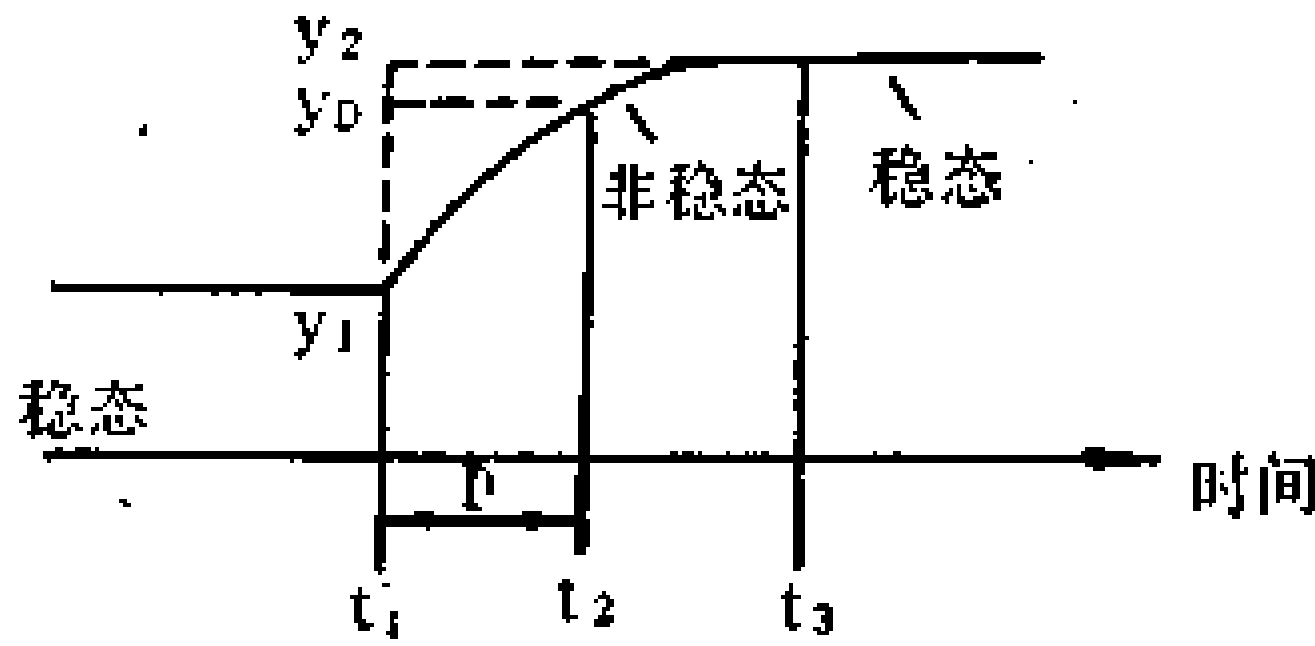


图 9·9 决策反馈回路

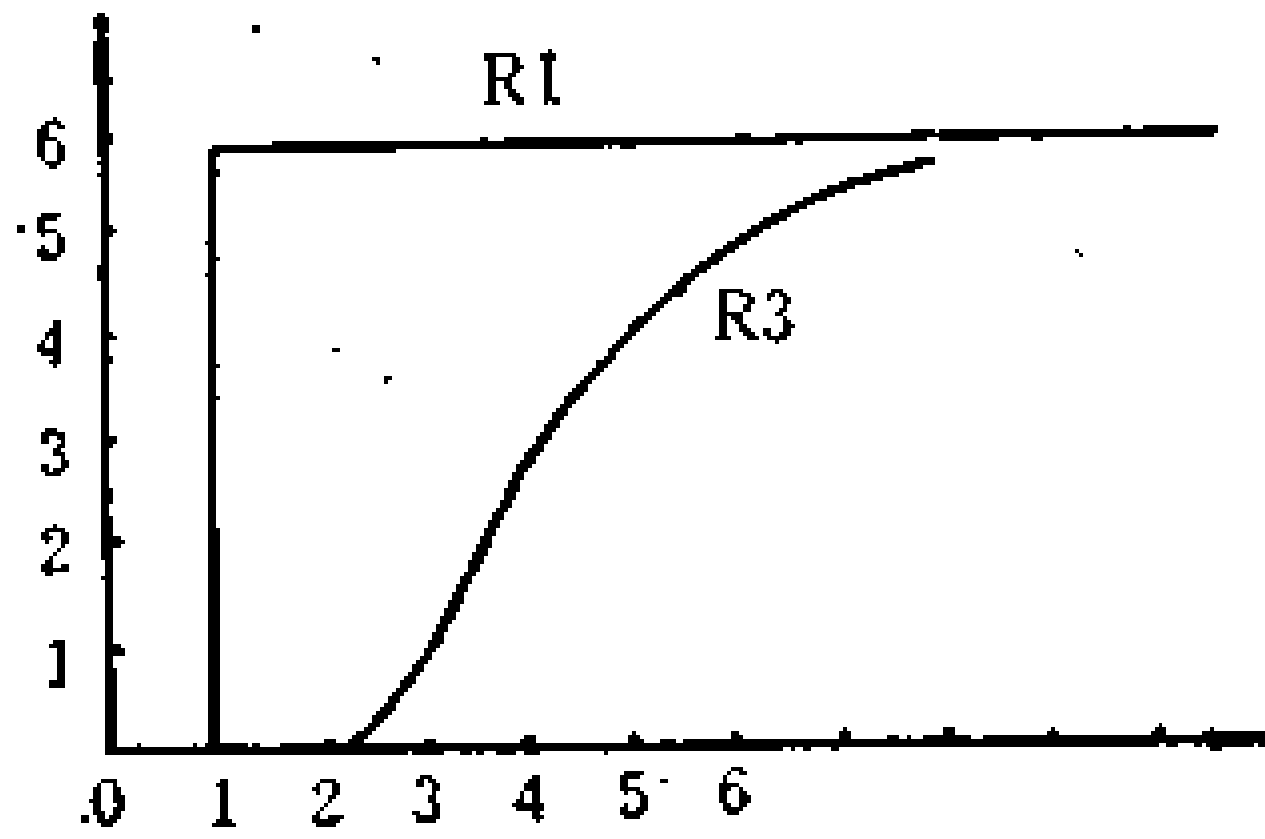
3. 延迟(Delay)

在现实的社会生活中,每一项决策的贯彻都需要一定的时间,系统内各因素的相互作用和相互影响,也需要经历一定的时间才能完成,这种现象叫做延迟。延迟现象在一般的系统模型中不易表达出来,但在系统动力学模型中,可以通过程序语言的几条延迟指令,就可以在计算机上对这种现象进行仿真模拟。延迟一般分为一次延迟和多次延迟。我们以工业投资为例来分析一次性延迟;如果投资完成以后,生产能力迅速上升,而后减慢,最后达到一定的生产水平上不再上升(见图 9·10, a),则可以用

一次延迟来表示。如果投资完成后，生产能力的变化呈现S形曲线增长趋势(见图 9.10, b), 则可以用三次或更高次的延迟来表示。



a)



b)

图 9.10 延迟图形

信息反馈的动态特征，在于系统中存在着延迟现象。当流的输入作用于系统之后，在延迟的一段时间内，输入流和输出流是不相等的，这就意味着系统中有流的残存量，因此，可以把延迟看作是流的特殊形式的积累，从而影响系统状态的变化。不论是实物流的延迟，还是信息流的延迟，都可以用积累方程或流速方程来描述。

二、系统动力学的模型和建模步骤

系统动力学主要研究复杂社会系统的动态行为,为此,就必须掌握系统的结构特征,并以这种结构为依据,对系统未来的行为作出预测和描述。系统动力学的模型就是对社会系统结构的一种模拟,通过模型来描述社会系统动态行为的特征。构成模型的基本要素是积累、流速、实物流、信息流等。表示模型的方法,一种是系统流图,另一种是结构方程式。

1. 系统流图

由于社会系统是一种多重反馈的复杂系统,我们运用语言和文字很难对其作出精确而又易于理解的描述。运用数学方程式虽然有时可以达到精确的计量结果,但是对于社会系统的复杂结构仍然很难清晰地表达出来。为了便于形象而直观地把握社会系统的结构和动态特征,人们借助于图形、图表等形象化语言,创造了系统流图的表达方式,以便人们能获得清晰的形象。

所谓积累是指系统内的实物流或信息流的堆积,可用一个



图 9·11 积累的符号

矩形方框图来表示(图9·11)。

矩形内标出变量的名称,指向矩形的箭头表示输入流,离开矩形的箭头表示输出流。积累也可以用计算公式

来表示,若在 Δt 时间内,积累由 L_0 增加到 L ,且输入流速和输出流速分别为 R_1 和 R_2 ,则:

$$L = L_0 + (R_1 - R_2) \cdot \Delta t$$

流速即单位时间通过的流量,可以控制输入流和输出流的大小,描述决策机构的功能,因而也叫做决策函数。人口决策函数可以控制总人口数(图 9·12);出生率是输入流速,死亡率是输出流速,两者决定着人口的状态。两边的源和流,表示系统的外界环境,对系统本身的状态不直接产生影响,画上它为的是增加描述的清晰感。

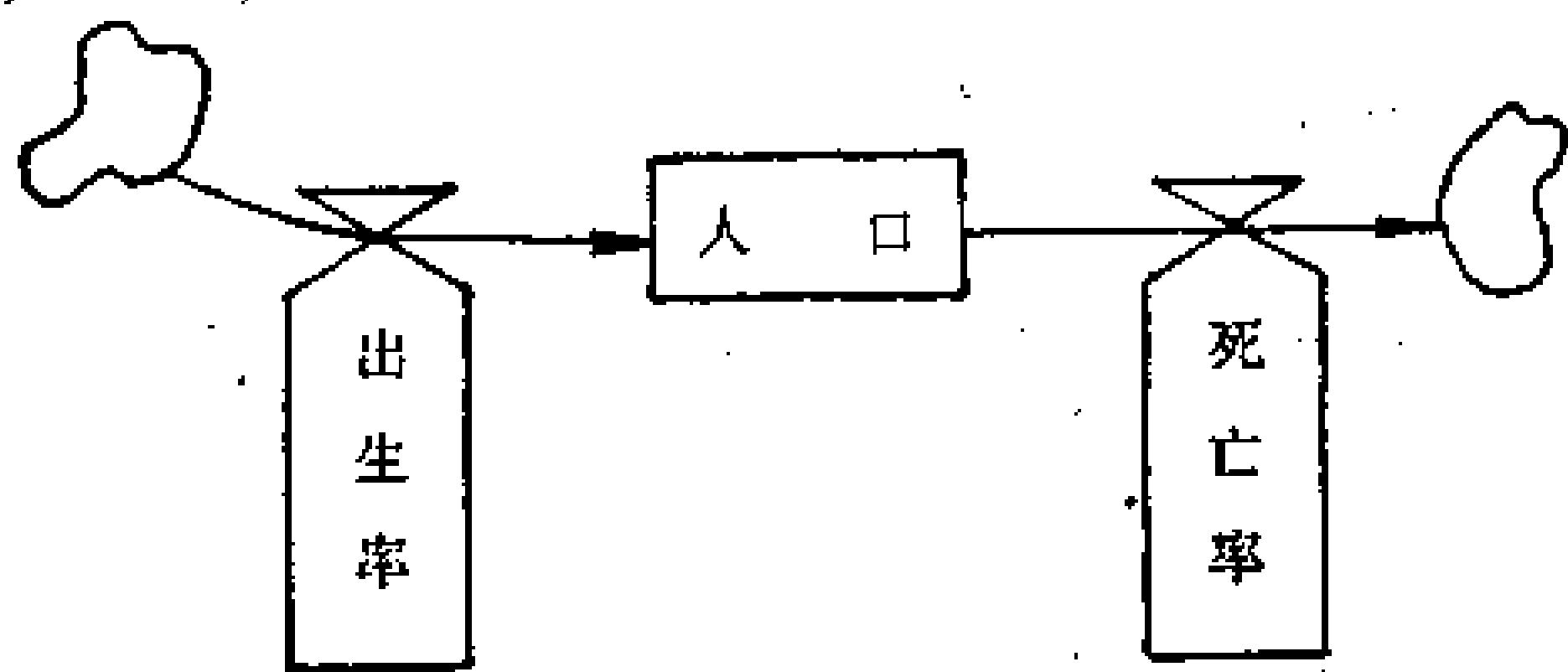


图 9·12 人口决策函数图

系统动力学模型在实际应用中通常有四种流,即物流、订货流、资金流、信息流,它们分别用不同符号的线段表示(图9·13)。流的符号表示系统中各要素间的相互关系和相互作用的性质,是系统动态行为的具体体现。

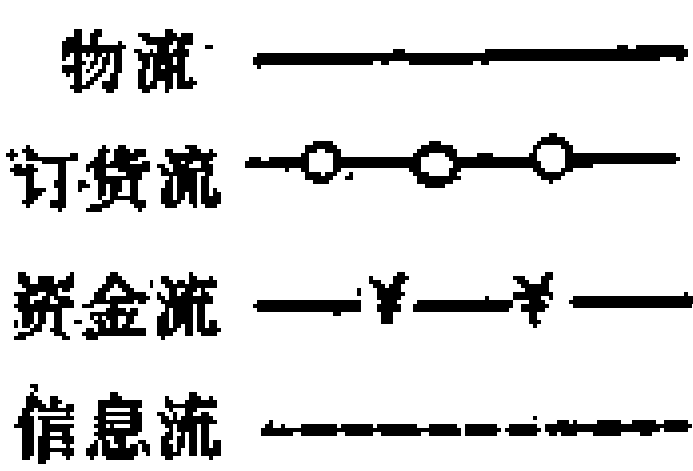


图 9·13 系统流的符号

系统流图就是由系统的要素符号和流的符号组成的、用以描述系统结构和动态特征的模型图。

2. 建模程序

解决复杂的社会问题,首先要建立描述系统结构和动态特征的模型,而建模的过程就是对系统进行观察分析并绘制相应

系统流图的过程。从系统动力学专家们解决复杂的经济社会问题的经验来看,建模过程还是有规律可循的,应遵循一定的方法和步骤。按照福雷斯特的观点,系统动力学的建模程序,可以划分为以下步骤:

第一步:确定所要研究的问题,包括研究系统的目标,划定研究系统的边界,确定所要解决的问题;

第二步:把所要研究的问题同其他相关的因素区别开来,划清影响系统行为的内生变量和与该系统无关的外生变量之间的界线;

第三步:寻找系统内主要因果关系的信息反馈回路,即决策——执行措施——信息变化——新的决策的反馈循环关系,并在框图上标出各因素间的关系,同时分析反馈回路的多重性,以确定系统的复杂程度;

第四步:确定各反馈回路中的积累变量和流速变量,积累是系统的状态变量,流速是控制变量,依据这些变量建立描述决策、信息和各要素相互作用机制的系统流图,并将各变量定量化,以便把描述方程式转换成电子计算机的专门语言;

第五步:用计算机进行模拟仿真实验,将系统行为随时间的变化打印出来,得到系统各因素变化的趋势;

第六步:把计算结果同真实系统进行对照,修正模型,如此反复,直至模型能比较真实地反映实际系统的状态时为止;

第七步:按照一定的假设条件,预测系统的未来发展趋势;

第八步:对系统进行灵敏度分析,模拟在多种条件下系统行为的特征,找出影响系统行为的最重要的因素;

第九步:重新设计政策,按仿真实验结果所指示的方向,改

善系统的状态,使系统的发展符合人们期望的目标。

3. 结构方程式

系统的信息反馈回路和流程图,可以简明而形象地描述社会系统中各元素之间的相互关系、相互作用的逻辑关系,揭示系统内部的结构,但是这种描述是定性的,不能精确计量各变量间的数量关系,因此系统流图还不能定量化的描述系统的结构和动态行为。为了达到定量化的描述,需要把系统的流图变换成结构方程式,在计算机上进行模拟计量。结构方程式是系统动力学模型的定量化表述形式,是对系统流图的数学抽象。

系统动力学模型的基本结构方程式是积累方程式(Level 方程式),简称L方程。若取系统的输入流为 X_1 , 输出流为 X_2 , 则积累变量Y的变化率为

$$\frac{dy}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Y(t + \Delta t) - Y(t)}{\Delta t} = X_1 - X_2$$

即

$$Y(t + \Delta t) = Y(t) + (X_1 - X_2)\Delta t$$

这是积累方程式的基本形式。它的含义是,现在的积累量等于过去的积累量加上输入输出流的差额乘以时间的增量。

七十年代初的福雷斯特—麦多斯世界模型,是用来研究世界范围的人口、生产部门、资源、污染等方面错综复杂关系的模型。按照系统动力学的结构方程式,每一变量都是由前一时刻的变量值,加上新增的输入量值减去减少的输出量值而得到的。我们以该模型中的污染子模型为例来说明它们的关系(图9·14)。世界每一时刻的污染量,等于前一时刻的污染量,加上生产、生活等部门所产生的污染,再减去环境所吸收的污染。其中环境吸收的污染又受到总污染量和吸收时间的影响。

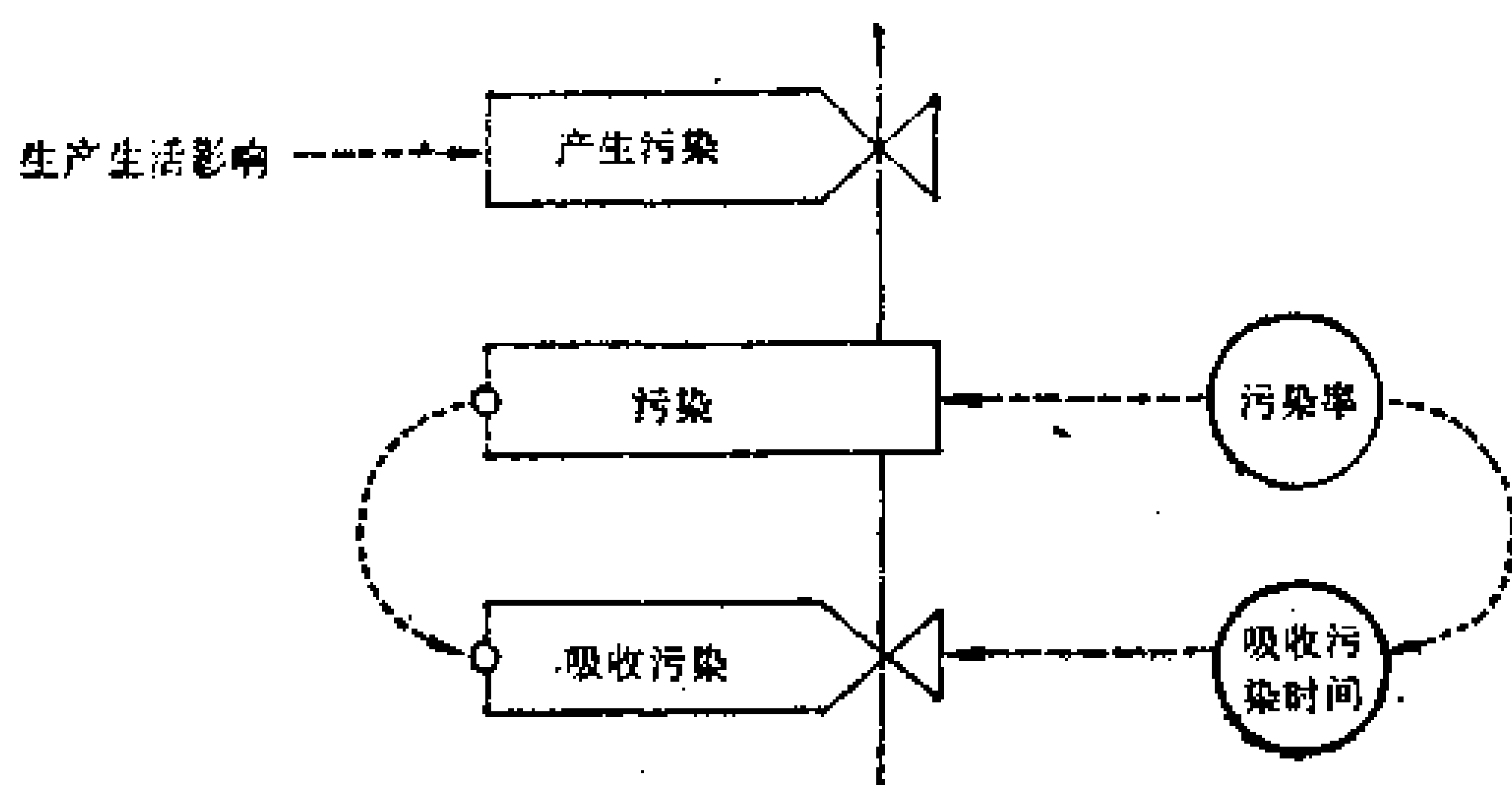


图 9.14 环境污染模型

运用福雷斯特—麦多斯模型，还模拟了 1900 至 2000 年间的污染、自然资源、人口发展、工业投资、生活质量等方面的发展趋势（图 9.15）。其中 1900 至 1970 年是实际统计资料模拟的；1970 年至 2000 年则是按各自不同的假设条件，在实测资料的基础上模拟。这个模型的计算结果表明，如果人类不控制人

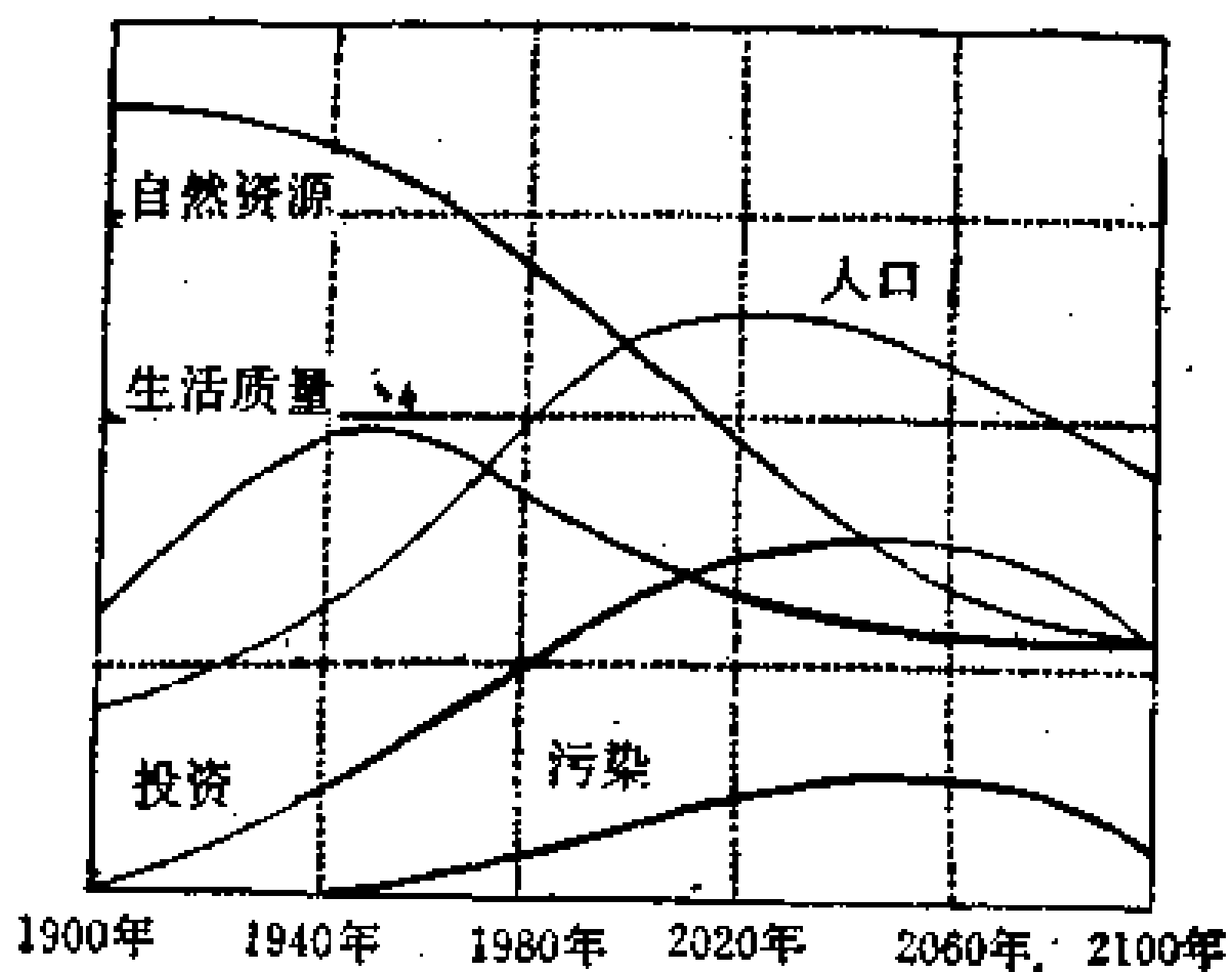


图 9.15 1900—2000 年世界动态模型图

口生育和工业投资增长的速度,使其转入均衡状态,那么由于地球生存空间的有限性,势必有一天会达到增长的极限,使人类遭受重大的损失,而后被迫转入均衡状态。福雷斯特等人主张,从现在起就应采取有效措施,对人口、工业投资进行控制,以期人类能够平稳地转入均衡状态,避免遭受重大的损失。他们的观点曾在世界范围内引起了很大的反响和争论。(马名驹编写)

第五节 协同学:理论与应用*

一、什么是协同学



协同学(Synergetics)一词来自希腊文,其含义是“一门关于协作的科学”,或者说“一个系统的各个部分协同工作”。

协同学研究一类由许多子系统构成的系统——这些子系统的性质可能截然不同,如电子、原子、分子、细胞、神经元、力学微元、光子、器官、动物以至人。协同学研究这些子系统如何协作而形成宏观尺度上的空间结构、时间结构或功能结构。协同学特别研究这种有序结构是如何通过自组织的方式形成的。

1. 系统。“系统”这个概念是大家熟知的一个概念,它既可以用于描绘非生命世界,如发动机、汽车、飞机等等都是系统的典型例子;也可以用于刻画生命世界,如动物、工厂,甚至是城市或者整个社会等也都分别可以看成是一个系统。大家知道,这些系统都是极其复杂的,因此,如果我们对系统的研究是从一些简单的模型系统(如激光、流体或者低级动物)入手,那对于我们

* 从第五节开始,各节均由该理论的创始人亲自撰写。

的研究将会大有裨益。

尽管世界上的系统千差万别，但它们还是存在许多共同点的。大家知道，所有的系统都是由组元、部分或者子系统构成的。这些子系统彼此之间会通过物质、能量或信息交换等方式相互作用。通过子系统间的这种相互作用，整个系统将形成一种整体效应或者一种新型的结构。在系统这个层次，这种整体效应可能具有某种全新的性质，而这种性质可能在微观子系统层次是不具备的。在许多情况下，这种整体效应或者结构是有意义的，并且能够用以实现某种目的。

但是，不同的系统之间也存在着许多差异，而主要差异之一在于系统的组织和自组织。

首先我们来考虑一下一个关于组织的例子，如一台机器。机器是由工程师设计制造的，它可以用来完成某种目的，如汽车的目的是运输。

我们再来考虑一下一个关于自组织的例子，如通常的动物比如说一只鸟。鸟有翅膀，其作用也在于飞行。但是从某种意义上说，鸟或者任何动物都是自己构造或者说自我组织的。

2. 协同学：就现阶段来说，协同学可以说是一门关于自组织的理论。但作为协同学未来的发展途径之一，我们可以将系统中的组织与自组织及其之间的相互作用加以综合考虑。协同学所要回答的一个主要问题是：

“能否找到某种能够支配存在于各类系统中的自组织现象的一般原理，这种一般原理与系统组成部分的性质无关？”

也许大家会认为这是一个非常奇特的问题，原因是各类系统的组成部分在性质上可能是截然不同的。一旦大家意识到各

类系统组成部分性质上的差异，也许就会对上述问题本身是否合理产生怀疑。但事实表明，如果我们把上述问题缩小一下，把注意力放在宏观尺度上质变产生的情形上，我们是可以找到这种一般原理、解决上述问题的。

二、关于自组织的几个例子

在进入这门学科的细节之前，我想先通过一些通俗的一般概念向大家介绍协同学的几个应用例子，目的是要大家明确协同学所要处理的问题。

例 1：化学反应(图 9.16) 化学中有一个反应叫 贝洛索夫-扎包廷斯基反应。在这一化学反应中，许多反应物被混合在一起、搅拌。搅拌的结果是有可能形成呈现均匀的液体。然而在一定的条件下，混合物却可以自发地形成某种螺旋结构(如图 1 左上角)，继而这些螺旋结构不断地生长，彼此之间相互碰撞，最后可以形成某种同心波。

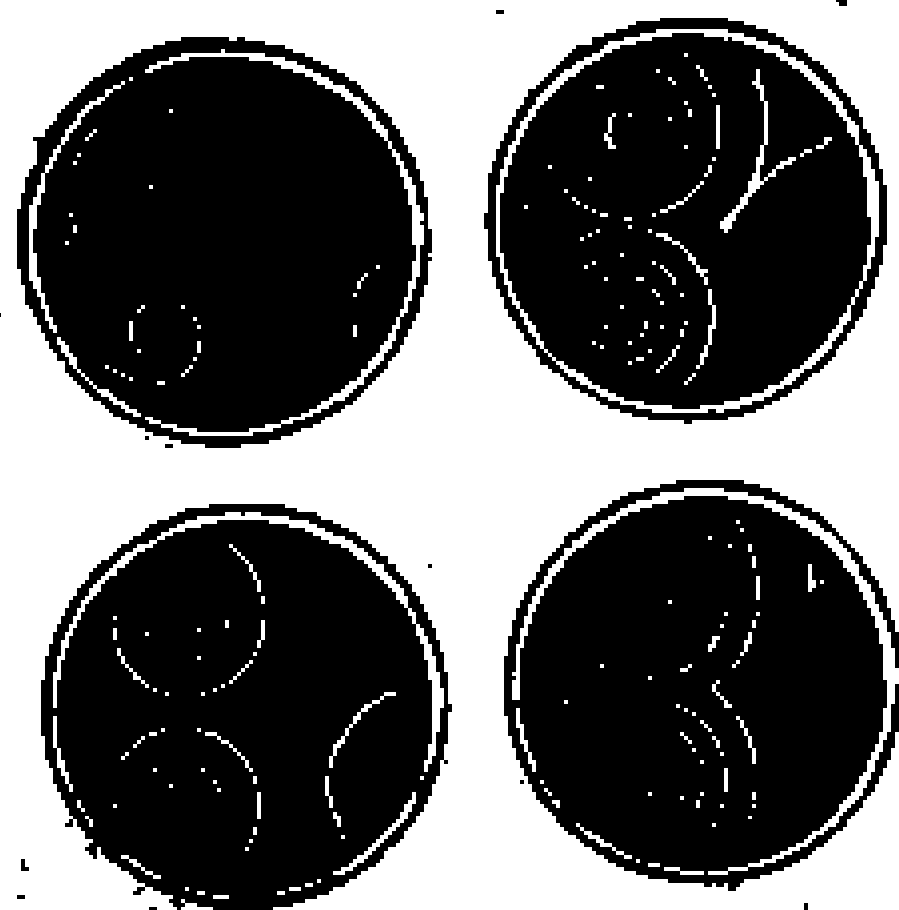


图9.16 化学反应中的图样形成

例 2：生物 图 9.17显示了一颗小蘑菇的各个不同发育阶段。原先只有作为个体的细胞(图9.17左)，这些细胞突然移向某一中心，并在那里聚集、分化、形成小蘑菇。这是一个典型的自组织过程。生物学家已经明白这些小细胞为什么会聚集、如何聚集；小细胞可以发射一种物质叫 cAMP (环状-磷酸腺甙)，然后在基体中迁徙、与其它分子碰撞，在碰撞的同时进一步产生

cAMP，通过这种 cAMP 的不断产生与扩散，演化形成了图 9.18 的特定图样——分子浓度的螺旋波。浓度图样的这种场起了信息场的作用，它告诉每一个细胞向何处移动。这些小细胞都有一个中心，这些中心可以感受到浓度场的梯度，然后它们朝着这个梯度场的中心移动。

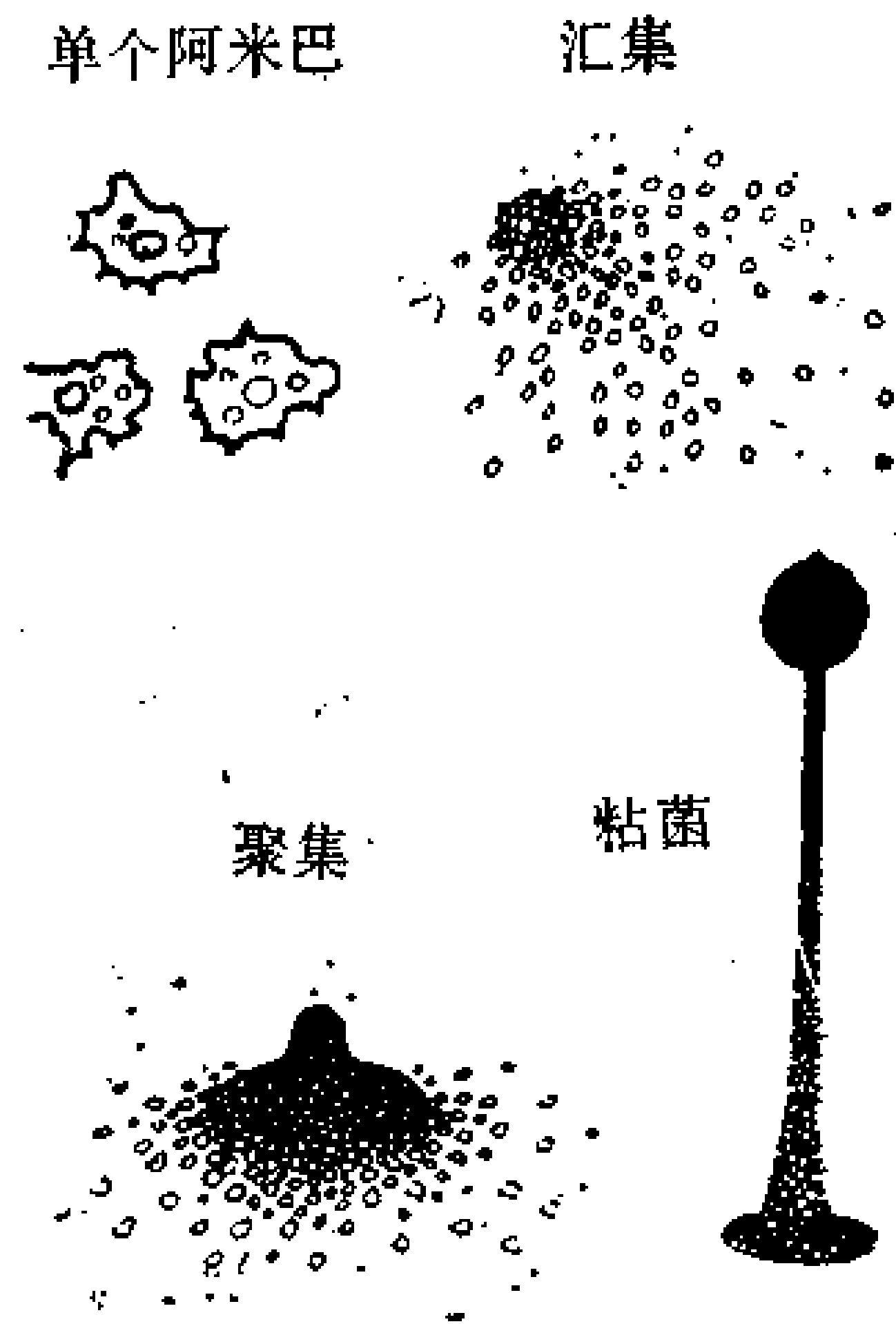


图 9.17 细胞粘菌的聚集作为胚芽发生中细胞相互作用的模型

上面所列举的几个例子事实上仅仅是我们所处理的许多问题中的几个。协同学的应用现已涉足到物理、化学、生物以及社会、经济等领域；所处理的系统也既有简单的系统，又有复杂的系统。比如说我们可以用协同学的理论对力学工程中的压曲现象，火焰的形成，云街的形成，斑马纹的形成，蝇眼的六角形图案

的形成等结构形成现象建立模型,作出解释。

而上面的例子表明:生命界与非生命界所形成的一些图样之间存在着惊人的类似。这向我们提供了一个启示:在这些图样形成的背后存在着一些更为深刻的基本原理。为了寻找这些基本原理,我们从一些简单的技术装置(主要是激光)来开始我们的研究。

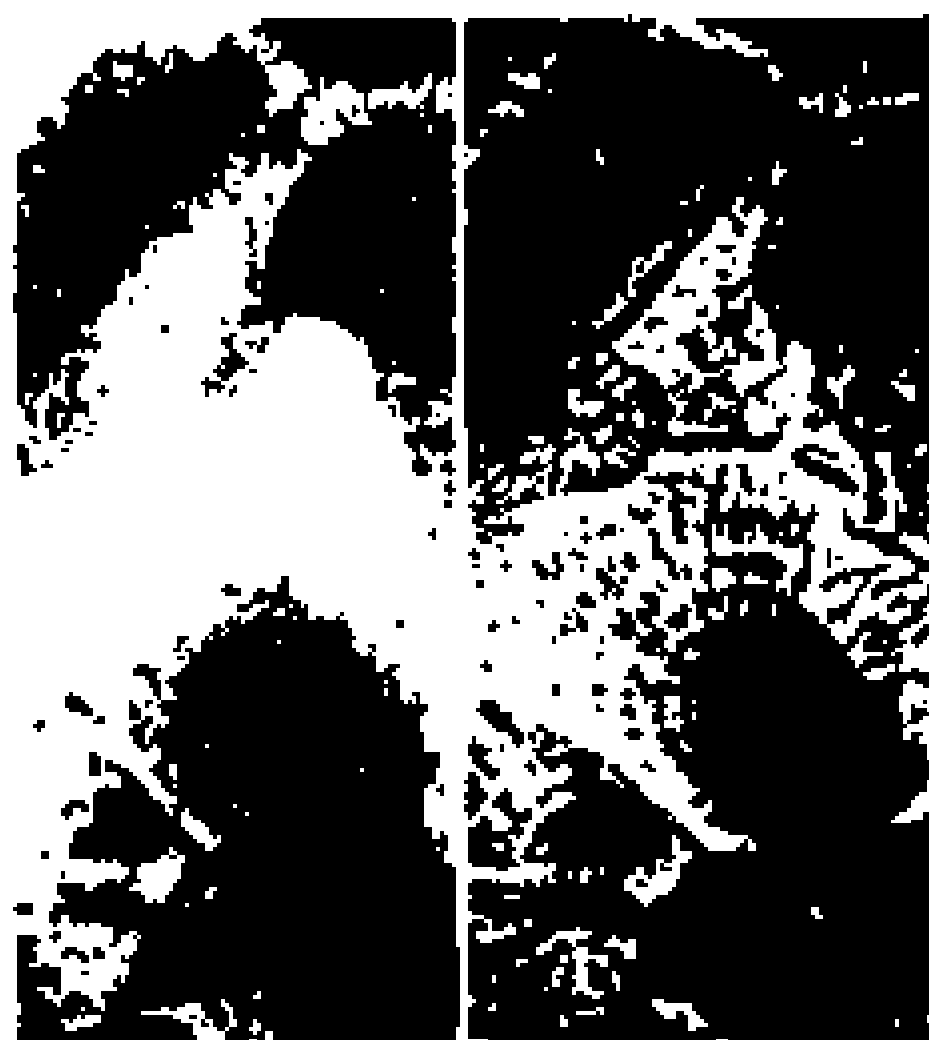


图 9.18 在稠密的粘菌细胞层中,趋化活性的波图样

三、协同学研究的范例:激光

在寻找这些基本原理的过程中,激光器曾经给了我们很多启示。一个典型的激光器是由一根晶棒或充满气体的玻璃管构成的,其两端镶有两面镜子,其中的激光原子或激光材料受到外界的泵激。当泵功率比较小时,激光器发出的光与普通灯光无异,而当泵功率达到一定的阈值后,激光器会突然从其中的一面镜子辐射出规则而优美的正弦波。

从原子物理学我们知道,光是由气体中的原子产生的。当我们从外界对原子进行泵激时,每一原子都受到激发,围绕原子核旋转的电子会从内轨道跃迁到外轨道。另一方面,当原子中的电子从外轨道跃迁到内轨道时,就发射出光波。当外界泵功率比较小时,不同原子中的电子从外轨道向内轨道的跃迁并非同步进行,这时激光器形成的光场事实上是杂乱无章的。换句话

说，激光器发出的光与普通灯光无异。但当我们增大泵功率达到某一临界值时，所有原子中的电子却能够以一种相当规则的方式从外轨道跃迁到内轨道，这时光强度骤然上升，效率猛然提高，激光器形成了一种有序状态。

如果我们把激光器中的每一个原子想象成一个站在海滨、正准备将其手中的棍棒扔到水中的人，那么对应于普通灯光的情形就是：不同的人是以一种彼此互相独立的方式将手中的棍棒扔到水中的；而对应于激光的情形是：这些人是以一种非常有规的方式把棍棒推入水中的，因而在水中形成了优美的相干水波。大家知道，现实生活中这种协同动作是通过某个上司的命令实现的，然而在激光器中并不存在这样一个对原子发号施令的上司，而是原子通过自己形成相干运动的。因此这是一个关于自组织的典型例子，我们必须研究自组织是怎样形成的。

四、自组织是如何形成的，支配原理 (Slaving Principle)*

这里我们利用一个流体力学的实验来说明自组织是如何形成的。实验是这样的：一个容器盛满了某种油，开始时油处于静止状态，然后我们从容器的底部以均匀的方式对油加热。结果，根据热胀冷缩，被加热的油会寻找途径上浮到容器的上部，而相对冷的油也会寻找途径下沉到容器的下部。

这类似于现实生活的这种情形：假定有一楼梯，其上端和下端分别有两群意欲向上和向下的人群。对于现实生活中的这个

即第五章中所述的“役使原理”，又有人译为“伺服原理”。——编者注

问题可能会有两种答案：一是人们在上下楼梯时是完全混乱的；另一则是完全有规律的：人们选择楼梯的一半向下，另一半向上。

自然界在给出这种问题的答案时事实上也是在不断地试验和选择着各种可能的集体运动。就上述流体而言，它有可能出现多种不同旋转速度的运动，但各种可能的运动之间并不是平衡的，它们在不断地进行着竞争。如上述流体既有可能出现旋转速度缓慢增加的“模”或“运动”或“组态”，也会出现快速衰减的组态。但是，“增长的组态将决定最终结构”。这种增长的组态的大小或幅度在协同学中被称为序参数。另一条可以用严格的数学证明得到的结论是：“快速衰减(弛豫)组态被迫跟随于缓慢增长的组态(模)”。一旦这种有序结构建立，系统对于微小扰动来说将呈现稳定。这就是用日常语言所描述的协同学的支配原理：慢变模或组态或运动支配快弛豫模或组态。

需要申明的一点是：这里的支配(Slaving)不具道德伦理上的含义，它只是一个技术术语而已。为避免误解，当我们将这些概念、原理用于解决社会科学中的问题时，我们最好采用一些意义相近的术语如“影响”、“关系”等等。

现在我们利用上述概念和原理，来考虑一下几对慢变量与快变量之间的“关系”或“影响”。在激光中，光场是慢变量，而原子是快弛豫变量，光场支配原子中电子的运动。在社会学中，作为社会交往媒介的语言是慢变量，而每个社会个体一生的语言变化是快变量。一个小孩从呱呱坠地开始就必须学习语言，受社会语言环境的影响和支配。类似地，我们可以把传统、文化、教育系统看成慢变量，而相应地把每个社会个体看成快变的量、适应的量、衰减的量，后者受前者的影响和支配，等等。

五、协同学的数学理论概述

下面我们来简单地对协同学的数学理论作一个概述。假定现在有一个系统，对这个系统的描述必须采用一个高阶状态矢量 $q(t)$ 。在流体或其它情况下，这个状态矢量在空间上是变化的，这时状态矢量应为 $q(x, t)$ 。我们注意到，世界上许多系统都可以用一组具有下列形式的时间进化方程来描述，即

$$\frac{dq}{dt} \equiv \dot{q} = N(q, \alpha) + F(t)$$

其中 N 是一个非线性函数，有可能是一个微分或积分算子，非线性性对自组织来说是绝对必需的。

在 N 中有一参数 α ，它是外界作用于系统的控制参数。一个典型的控制参数例子是系统的能量输入。协同学所处理的这种控制参数是以一种“不确定”的方式作用到系统上的。一个关于这种不确定性的例子是：我们对流体加热的方式是均匀的。此外，我们还在上述方程中引入了涨落力或者叫随机力，它对于促发自组织的形成是必需的。

一方面，上述方程可以描述任何系统；另一方面我们又要求能得到上述方程的解。为此，我们将注意力放在这样一种情形，也就是旧状态失去稳定而即将由新的稳态所代替的情况，换句话说，我们希望处理宏观结构出现或者旧状态被新状态所代替的情况。

现在我提纲挈领地论述一下我们处理上述问题的办法的基本步骤。我们假定对某个特定的控制参数 α_0 已经找到了方程的解 $q_0(t)$ 。 $q_0(t)$ 对时间 t 的关系有可能是常数关系、周期关

系或者准周期关系（相当于含有几个基频）。另一方面 $\underline{q}_0$ 对空间的关系则完全可以是任意的，最简单的关系是 $\underline{q}_0$ 不取决于空间座标，如静止的流体。现在我们来研究一下控制参数的改变将会产生什么样的结果。

1) 线性稳定性分析 首先我们必须研究控制参数改变后，旧的状态是否仍然稳定或者变得不稳定了。为此我们进行一次经典的线性稳定性分析。我们把所寻找的新解记为旧解（旧状态）与一个微小偏差的加和，即

$$\underline{q} = \underline{q}_0 + \underline{\omega}$$

然后将这一假定代入初始方程，并作线性化处理，即可以得到关于 $\underline{\omega}$ 的方程：

$$\dot{\underline{\omega}} = L\underline{\omega}$$

我们可以找到 $\underline{\omega}$ 的两种类型的解：一是 λ 为正 (λ_u) 时呈指数增长的解；一是 λ 为负 (λ_s) 时衰减的解。即

$$\underline{\omega} = \begin{cases} e^{\lambda_u t} \underline{v}_u(x, t) & \lambda_u \geq 0 \\ e^{\lambda_s t} \underline{v}_s(x, t) & \lambda_s < 0 \end{cases}$$

同时这些方程也决定了 $\underline{v}_u$ 与 $\underline{v}_s$ 的形式，如 $\underline{v}_u$ 或 $\underline{v}_s$ 有可能采取正弦波的形式。

2) 在新基 $\underline{v}$ 上对 $\underline{q}$ 作变换，系数记为 $\xi_u(t)$ 、 $\xi_s(t)$

现在我们把 $\underline{q}$ 表示成所有这些可能模 $\underline{v}$ 的叠加，但是我们还不知道叠加的系数或幅度应取多少。记 $\underline{v}_u$ 的系数为 $\xi_u(t)$ ， $\underline{v}_s$ 的系数为 $\xi_s(t)$ ，

$$\begin{cases} \dot{\xi}_u = \lambda_u \xi_u + N_u(\xi_u, \xi_s) + E_u(t) \\ \dot{\xi}_s = \lambda_s \xi_s + N_s(\xi_u, \xi_s) + E_s(t) \end{cases}$$

我们把旧系统 $\underline{q}$ 变换到新的座标上，这种变换并未改变系

统本身的复杂性,但却可以使我们较为便当地处理上述方程。

3) 支配原理 (Slaving Principle) 请记住上述 λ_u 是正的量而 λ_s 是负的量。现在我们可以通过数学手段导出支配原理了,它告诉我们,所有的被支配模 ξ_s 都可以由序参数 ξ_u 显式地表出,即

$$\xi_s = f_s(\xi_u, t)$$

f_s 还直接取决于时间 t ,这是因为涨落力取决于 t 。这就是前面我们用语言描述的支配原理的数学形式。

4) 序参数方程 对于我们所处理的大部分现实问题来说,序参数的数目通常是为数极少的,而被支配模的数目则可能是庞大的。这意味着我们可以将由原来的方程所描述的极其复杂的系统简化为一些相对来说简单得多的方程即序参数方程了

$$\dot{\xi}_u = M(\xi_u, F)$$

在物理或化学中,序参数的确定以及快速衰减的被支配模的确定相对来说要容易一些。但当我们着手处理一个复杂的系统如工厂的生产过程或者群体动力学或者经济系统时,一个重要的任务,也许也是将来的任务,就是如何识别慢变模与快变模。

六、组织、自组织及其对于社会经济管理的启示

最后我想再简单地说明一下组织与自组织的概念,以及控制论与协同学之间的关系。一方面在控制论中,大部分构造的系统都有一个目的,外界以一种特定的或者说明确的方式对系统施加控制。我们可以把这种控制称为硬控制、直接控制或者确定控制,通过这种控制,系统实现既定的目的。另一方面,协

同学所指的控制是一种软控制、间接控制或者说不确定控制。自然界告诉我们,通过这种不确定的控制,系统也可以演化形成某种新图样或者新结构。

事实上,对于一个社会的管理,可以同时采用这两种类型的控制。比如说在宏观经济管理中,我们一方面有计划经济模式,另一方面有市场经济模式。前者主要表现为硬控制、直接控制,而后者则主要表现为软控制、间接控制。而在西方市场经济的诸多宏观间接控制手段中,最主要的手段是政府的财政政策与金融政策。如何在组织与自组织之间、或者说硬控制与软控制之间折衷、寻找一种平衡,这是协同学理论研究的一个发展方向,也是我们在应用协同学理论时所应注意的一个关键。

(杨炳奕译)

第六节 生命系统理论

James Lovelock

James E. Smith

本节将介绍一种研究生物和社会这两大生命系统以及有关技术的一体化的概念方法。

生命系统理论是科学统一运动的一部分。我们认为,不仅在基本概念方面,而且在所使用的量纲和量度方面,物理科学、生物科学和社会科学的统一是完全可能的。我们希望这种方法最终能有助于弥补现代科学在结构上的严重裂痕。现在关于生命系统的许多知识并未用与物理科学和工程学相一致的概念或

量纲来加以说明。科学上这一严重的不连续性产生许多不良的后果。其中之一是人机接口中概念和量纲上的差异在我们的技术社会里显得日益明显，日益严重。我们正在尝试在包括人类在内的所有生命系统研究中使用与物理科学中一样的概念和量纲。这一方法的一个成就也许是使人类技术更加精致，更加准确，更加有效。

科学知识自1800年起出现了巨大发展。如果以出版物的数量来度量，科学在上世纪和本世纪是按指数规律增长的，直至不久之前为止每十年增长一倍，而现在则每六、七年增长一倍。没有人能跟得上如此巨大的理论成就与事实资料。结果，科学家们专门研究有限的领域。现代科学由大量的高度专门化的知识岛屿来组成，每个岛屿由相对少数的科学家来分享，实际上他们不与其他学科的科学家进行交流。专门学科在科学共同体中受到尊重。通用学科，即这些岛屿之间的桥梁却得不到广泛重视，以至被许多科学家认为是无足轻重的。然而，如无这种桥梁，我们将永远也不能看到现代科学的总体模式。

当然，这种研究方法并不是新的。科学上从最初起就有了一些通才。的确，如同E·费米曾经所指出的那样，科学上最重大的发展是由于象托勒密、毕达哥拉斯、哥白尼、伽里略、牛顿和爱因斯坦这些通才的工作而发生的。在每一个新的更广泛更精确的一般理论发表后接着是基础研究、应用研究和技术的发展。科学上的大飞跃都是由一些一般理论表征的。那些了解门捷列夫以前化学情况的化学家们就能体会到他的元素周期表概念如何从根本上改变了化学领域，并且自那以后化学是多么富有成果。生物学家了解达尔文在生物学上的革命性影响。这些人创

造了能使科学前进的框架。

积极的态度应该是，我们不是去只看我们在那里是专家的那些领域，而是经常问我们自己：我们的工作与我们的同事在其他领域的工作之间有什么关系？我们这棵特殊的树在科学的大森林中起着什么作用？

在日常事务的现实世界中，不管一个人是在与电子计算机和信息处理打交道，还是与房屋、财政、立法或工业生产打交道，所有问题总是跨学科性质的。每个较重要的活动都需要把工程师、律师、经济学家、计算机科学家、生物学家以及社会科学家的技能按不同方式结合起来。换言之，“现实世界”并不象学术世界那样被分成各门学科。

因为不同领域的专家经常不理解另一领域的专门术语，所以他们在讨论共同关心的问题时通常使用含糊不清的语言。这是不能令人满意的。我们需要一种建立在一体化概念方法基础上的严密的跨学科语言。

过去的十年已出版了几本通用学科方面的著作，它们反映着为综合生物科学和社会科学所作的各种努力。这些书受到了广泛注意。本世纪初这些书可能不会被科学家广泛阅读或接受。

生命系统理论作为一种一般系统理论，就是这样一个具有通用学科性质的概念体系。它认为在层次等级中形成一个子集的生命系统共有八个层次，而这里的层次等级从最小的可分割的物质形式进展到分子、多分子系统、行星系等等，最后达到最大系统即宇宙。

生命系统是具有能保持甚至随着时间推移能增强其边界内

部低熵状态这一特性的多分子系统。它们能作到这一点，是因为它们是输入高负熵的物质，如燃料或食物，并以废物形式输出低负熵物质的开放系统。当一个生命系统边界内部的熵减小的时候，在把该生命系统及其环境包括在内的更大系统中熵是要增大的。因此热力学第二定律并未被违背。

一、层 次

生命系统的八个层次是：细胞，器官，生物体，群体，组织，社区，社会，以及超国家系统。

每个层次都是从生命系统等级中低于它的层次中进化来的。各层次系统的基本组元是低层次系统。器官由细胞组成，生物体由器官组成，依此类推。高层次系统是其组元系统的超系统。组元的结构与过程状况发生变化，是由于它们要适合于它们在高层次系统的分系统过程中的角色，但它们保持着低层次的本质特征。

各层次系统以低一层次系统作为其基本组元，这一事实并不意味着可以把任一系统理解为低层次系统的简单堆积。一个细胞不能由组成它的各分子化学性质的相加来说明，对各器官结构和功能的甚至很详细的叙述也不能说明一个生物体。各层次具有低层次上没有的突现特性。

突现过程起因于系统复杂性的增加，而系统复杂性的增加又是由于组元数目的增多、不同种类组元的增加，以及组元之间的更复杂的关系而产生的。生命是在细胞层次上突现的。在物理空间的大区域中进行传导过程的能力是与器官一起突现的。尚无证据认为联想学习能发生在生物体以下的任何层次上。生

物体在筑巢、造穴、狩猎以及抚养幼小这些活动中进行合作，是与群体一起突现的。社会组织与相互作用的新形式，以及技术上的进化性进展是在组织、社区、社会和超国家系统中突现的新事物。

进化的总方向总是朝向结构与过程的规模的扩展和复杂性的增大。更大更复杂的系统为了维持和扩展可以转换和储备更多的能量。因此，它们能适应于更大范围的环境变化，经受住更大的压力，并能利用复杂性低的系统所不能生存的那种环境，它们还通常活得更长久。例如，最低层次即细胞用细胞膜进行多重过程，而这些过程在高层次上需要大量组元。

我们把复杂性的这种增加称作“散裂”。这好象是粗索分成几股粗绳，每股粗绳分成几股细绳，每股细绳又分成多股线，它们又分成细线。每个层次都有相同的一组分系统过程。但是在高层次上这些过程以比起低层次复杂得多的方式进行。

在每个层次上互不相同的所有系统，与其他层次的系统相比，互相之间更为相象。因此识别某一特定系统所归属的层次通常不是困难的事情。它们都是由类似的组元组成的。它们组元的空间排列遵循特有的模式。它们还具有一些共同的过程，这些过程不同于其他层次系统的过程。

可是层次之间的转变并不总是突然的。进化是通过连续不断的小变化进行的，而这些小变化在形成新层次的再组织中达到顶点，所以在各层次之间通常出现一些过渡形式的系统。

现在我们要讨论八个层次系统的进化和特性。

(1) 细胞。这些最小且复杂性最低的生命系统是所有其他生命系统的基本组元。最大的细胞勉强能用肉眼来看到。所有

其他细胞则是微观的或亚微观的。细胞的基本组元是无生命的分子和细胞器，这些细胞器是多分子集合物。微观分子如脱氧核糖核酸、核糖核酸和蛋白质，是细胞、器官以及生物体层次上的复制所必需的，而且是基本有机化合物的合成所必需的。在地球目前的氧化性大气中，它们在细胞之外的自然界中是不能被合成的。

复杂性最低的细胞，其中包括细菌和蓝绿藻类，是“原核”细胞。它们的遗传物质自由分布在细胞质中。所有其他细胞是“真核”细胞，其中核膜包围着遗传物质。

最初的细胞是在经历了漫长的前生物进化阶段以后大约在35~38亿年前从无生命分子进化来的。原始的地球大气几乎不含有游离氧，并被认为是有利于从在那遥远时代存在于温暖浅海里的化学物质中合成蛋白质和核酸。最后，有这样一种分子，可能是一种原始核糖核酸，变得能进行复制，而且能生产为它们的进一步复制提供催化支持的蛋白质。这种分子同外侧的细胞膜和脱氧核糖核酸一起成为地球上从古到今所有生物系统的先驱。然后接着发生的是它们的进化性发展。

在细胞拥有它们自己的行星的20亿年多的岁月里，它们的复杂性有了增加，从而适应了各种环境条件。最后，一些细胞达到其尺寸进一步增加的限度，因而也就达到了其复杂性的限度。发生这种现象，可能是因为，细胞基本上是球状的，而球形的表面积与体积之比表明，当体积以立方函数增加时，表面积却仅以平方函数增加。结果，细胞膜表面会变得不能处理细胞内部各部分所需的充足的基本输入。草履虫有两个细胞核和许多分异组元，它们在许多方面就象动物有机体那样活动。它们可能已

充分发达到单个细胞所能发达的程度。

(2) 器官。多细胞生命系统是进化论对细胞复杂性的增加所作的最终回答。它们都有某些能使基本输入达到它们所有细胞边界的适应性变化。

在最初的多细胞系统中各细胞之间几乎没有什么区别。它们可能已类似于现在的集群生物体。各细胞在结构与过程方面的进一步分化产生了结构上类似于生物体器官的系统。即是说，它们具有特化的细胞和组织(tissue)，但在其内部几乎没有多细胞结构。没有一种独立生存的系统被归类为器官。

生物体器官是定域的或分散的功能单元，这些单元是由在胚胎发育过程中形成的特化的细胞和组织(tissue)构成的。

(3) 生物体。这个层次包括三大界：真菌、植物与动物。各界的系统具有互不相同的细胞以及由组织(tissue)和器官组成的特殊构造。

(4) 群体。群体层次包括有动物和人类的配偶；群居昆虫的“社会”；人类和动物的家族、集群、学校或类似的集合体；人类的委员会和工作团体；以及由人类形成的多种多样的俱乐部、其他社交团体和娱乐团体。其中最早的或许是配偶或由最早的有性物种组成的进行生育的其他集合体。

(5) 组织。这一层次系统的组元是群体和小组织。最初的组织出现在大约 10000 年以前，当时人口增多，技术也有了进步，有可能从事大规模工程项目。它们的特点在于多重梯阶的管理和控制。

最初的组织可能是如象考古学家已在美索不达米亚研究过的那种灌溉工程。最近几十年，在中东发现了一些规模庞大的

古代矿井，为建造它们想必需要了组织。埃及金字塔的建造也是如此。在一座金字塔上有一幅画有管理人员的图画，他站在尚未竣工的金字塔上，指挥着他的下属，这些下属则按次序管理着众多民工，而这些民工正在借助绳索和骆驼把巨大石块拉到适当位置上去。中国的万里长城想必也是靠组织建造的。

这个层次包括如象协会、兄弟会组织和宗教组织、军队、医院、大学以及政府机构这些现代组织。

(6) 社区。这个层次的系统有村庄、城市、郡县、宗教管辖区域、州以及社会内部的其他单元，在那里人们在某种形式的有组织的政府领导下共同生活。社区的组元是组织或群体。原始村落以群体作为组元。

以组织作为组元的社区是由于人口增加和村落的发展超过最初的控制形式而进化来的。国王代替了大城市的酋长和首领。官僚化的行政部门和军阶等级森严的军队支持着这些政府。社会的分层、书面语言和编辑成典的法律系统是在这层次上突现的。自从这些遥远的早期社区产生以来，大型现代城市和今日的特大城市得到了发展。

(7) 社会。这个系统拥有组织和社区如州或类似的行政管辖区域作为其组元。社会是象特洛伊、雅典、斯巴达这些城市把它们的控制范围扩展到城墙外部地区，从而变成城邦而进化来的。社会的现代形式是多民族国家或单一民族国家。

(8) 超国家系统。这种大系统是社会大约晚一千年出现的。它们由两个以上的社会组成。这个层次包括古代帝国如巴比伦、埃及、希腊、罗马和中国，还包括现代多国系统如联合国、欧洲经济共同体以及北大西洋公约组织。

以上所述是进化到现在为止的生命系统的八个层次。也许在未来的某个时候,人们将在宇宙的别处遇见智能生命形式,或者看到智能生命形式居住在我们太阳系内部或外部的某些行星之上。到那时就会出现生命系统的第九个层次即星际系统。

二、分 系 统

所有层次上的生命系统为了生存就必须进行至少 20 个基本生命过程,我们称之为分系统过程。每个过程是由系统的一组特殊结构组元来执行的,这些组元结合在一起构成分系统。一个分系统可能具有一个或多个组元,而一个组元可能与一个以上分系统过程有关。两肺是后一种情形的一个例子。它们是几个摄取器组元中的两个(吸进氧气),又是几个排放器组元中的两个(从生物体中排除二氧化碳)。一个分系统的各组元在空间上可能位于一起,也可能相互分离。

生命系统必须获得食物、燃料以及其他物质。它们必须以各种方式使用这些物质来维持其结构,进行复制,制造产品,并进行其他一些过程。因此在生命系统中存在着基本的物能代谢作用。这是生命系统的力能学问题。

生命系统还有另一种代谢作用,即信息的输入、流通和输出。这种流控制、整合、协调和组织生命系统。

有两个分系统处理所有这三种流,即物质流、能量流和信息流。边界分系统对于物质、能量和信息的输入与输出进行过滤,还保护系统使之顶住外部压力。复制器在组织物质和能量的过程中按照系统遗传指令或宪章中的信息生产出新一代。

八个分系统主要处理物质和能量。摄取器为系统带进输

入。分配器把来自外部的输入或来自其他分系统的输出带给系统的所有部分。变换器把原始输入改变为能在系统内部使用的形式。生产者制造出系统所需的新的物质或能量形式。所有生命系统都以某种形式的物能储备器分系统储备着物质和能量。产品和废物由排放器搬运出去。生命系统为了靠近所需输入物，与捕食者作斗争或脱离危险情况，就必须具备相对其环境的移动能力，因此它们具有驱动器分系统。植物和座生动物通常只移动系统的某些部分。所有生命系统都需要支持器，使其组元为进行相互作用而充分靠近，但又为避免相互挤压而使之充分分离。从细胞到超国家系统都有支持器。为了支持作用，一些最大的生命系统使用庞大的无生命组元，其中包括建筑物、桥梁、道路、其他市政工程以及地球本身。

有 10 个分系统主要与信息代谢有关。生命系统如果不能探测并识别环境中的特殊模式，就不能搜索食物、进食、搏斗、逃离或者作出任何它所要作的其他事情。它还必须从它的所有组元中接收信息。申农认为信息的数学公式也就是负熵的公式。信息代谢是与负熵有关的。

输入转换器，或称感觉器官，是把关于环境中客体的信息带进系统的分系统。还有一个内部转换器分系统，它把各组元的状态报告给总体系统。其次有信道与信息网，它们把信息传送到系统各部分又从系统各部分获取信息，如同分配器将物质和能量输出给系统各部分，又从系统各部分接收废物。下一个分系统是解码器，它把信息从系统外部所用的“公用”码转变为“专用”码或内部码，或者可能按顺序增加系统内部使用的这些代码。

联想器和存储器进行两个部分的学习过程。联想器把一部分信息量子结合到知识或学问的模式上；而另一些信息量子则被储备在存储器中，以后可被检索。

定时器通过信道与信息网分系统接收输入信息与内部信息，并使系统保持时间上的定向。它能被调准到与系统外部事件同步。定时器发出的信号产生系统过程在每日、每月、每季或其他时间间隔中的有规则变化。对细胞、器官和生物体“内部钟”的研究目前是一个活跃的研究领域，而在这些系统中引起定时过程的组元正在被揭示出来。在生物体以上层次上，动物和人类在各种期间内的循环对许多活动进行调整。各种各样的时钟是在定时过程中使用的人工器物。

在所有分系统中最重要的是决策器，它对整个系统进行控制。它从输入转换器接收关于环境的信息输入，并从内部转换器接收关于总体系统以及各分系统状况的信息，还接收过去储存在联想器和存储器中的信息。所有这些信息是通过信道与信息网传来的，并解码为供决策器使用的代码。从这些输入中产生多个备选方案。然后就开始筛选过程。“决策”(Decide)来源于拉丁语“切割(to cut)”。对各种备选方案进行“切割”，统计上的自由度随之下降，也许要通过多个梯阶的决策器，直至达到一项最终决定。然后，用来控制和协调各分系统过程的信息被传送到各组元。

一个系统的决策器可能集中于单个组元，或者分散到几个或所有组元，但是产生统一活动的一些装置则存在于一切活着的系统中。

如果决策要求把一信号传送到另一系统，编码器就把它转

表 1

生命系统层次一分系统表

分系统 \ 层次	细 胞	器 官	生物体	群 体	组 织	社 会	超国家系统
复制器	染色体	无； 向下分散于 细胞层次中	生殖 器	配偶	为组织发 放许可证 的群体	立宪会议	产生另一超 国家系统的 超国家系统
边 界	细胞膜	内脏被膜	皮肤	武装警官	组织所有 权护卫队	边境护卫 队组织	超国家边境 护卫队组织
摄取器	细胞膜 间隙	器官的输 入动脉	口部	供应点心 和饮料等 的人	接纳部门	进口公司	管理国际港 口的超国家 系统官员
分配器	内质网	器官的血管	维管 系统	向家庭成 员分配食 物的母亲	监工	运输公司	联合国儿童 基金会
变换器	线粒体 内的酶	实质细胞	上消 化道	屠夫	炼油厂经 营群体	炼油厂	欧洲原子能 联营
生产器	线粒体 内的酶	实质细胞	未知 *	厨师	工厂生产 单位	工厂	世界卫生组织
物能储 备器	三磷酸 腺苷 (ATP)	胞间液	脂肪 组织	贮存食物 的家庭成 员	贮藏室管 理群体	存货公司	国际红十字 会
排放器	细胞膜 间隙	器官的输 出静脉	尿道	清扫妇	交货部门	出口公司	国际原子能 机构废物处 理部门
驱动器	微管	器官的肌 肉组织	腿部 肌肉	无；横向 分散于共 同移动的 所有群体 成员中	驱使组织 全体人员 移动的一 小部分核 心人物	汽车货运 公司	北约组织运 输部门
支持器	微管	基 质	骨骼	体力上支 撑群体其 他人	组织建筑 物管理群 体	管理公共 建筑物的 国家官员	管理联合国 境与超国家 界的超国家 官员

表 1(续) 生命系统层次一分系统表

层次 分系统	细胞	器 官	生物体	群 体	组 织	社会	超国家系统
输入转换器	细胞膜的特殊感受部位	感觉器官的感受器细胞	外感受器器官	监视者	电话话务员群体	国际新闻服务部门	为超国家系统提供信息服务的部门
内部转换器	阻遏物分子	心脏窦房结的特殊细胞	对血液状态变化作出反应的感受器细胞	向决策器报告状态的群体成员	检查单位	民意测验机构	超国家检查组织
信道与信息网	细胞膜	器官的神经网络	网状神经系统的组成部分	通过空气或其他传递信号的群体成员	民间电话交换台	国立电话网	万国邮政联盟
解码器	分子组合部位	感觉器官的感受器或次级细胞	感觉中心内部细胞	译 员	外语翻译团体	语言翻译单位	超国家语言翻译单位
联想器	未知*	未知*	未知*	无; 横向分散于联结群体的成员中	无; 向下分散于各个人与物体中	教学机关	超国家大学
存储器	未知*	未知*	未知*	家庭的成年人	档案室	图书馆	联合国图书馆
决策器	调节基因	窦房结的交感纤维	大脑皮质部分	户 主	行政办公室	政府	欧洲共同体部长会议
编码器	激素产生部位	器官输出前神经原突触区	人的优势大脑半球的颞叶	群体声明撰写人	语言与书写部门	新闻秘书	联合国国际情报局
输出转换器	前突触膜	器官输出前神经原突触区	喉 部	发言人	新闻发布室	政府发言人办公室	华约组织正式发言人

化成能在环境中传输的公共语言，而输出转换器把它送出系统边界。

把生命系统八个层次上的各分系统排列起来，就能形成一张十分精采的生命系统层次一分系统表（见表1）。因为社区层次和定时器分系统是最近新提出的，所以表1尚未填入。此表共有133格，其中每个格都填写相应分系统组元。在填写这张表时所遵循的原则是，在动物组元和植物组元中优先选取动物组元；在人的组元和其他生命系统组元中优先选取人的组元；在群体层次上优先选取家庭组元；在群体以上层次上优先选取与联合国有关的实例；在器官及其以上层次上，在通信信息流与通货信息流中优先选取通信信息流。

表中可见，有四个格表明那些分系统不存在组元，它们是器官的复制器、群体的驱动器、群体和组织的联想器，这些分系统过程被分散到其他层次上去了。此外，还有七个未知格，它们是细胞、器官、生物体的联想器和存储器，生物体的生产器，但仍有证据认为在这些层次上确实进行着这些分系统过程。

三、调 节 过 程

生命系统在高度不确定的环境中维持它们低熵的内部组织，在这环境中它们根据不断变化的物质流、能量流和信息流调节无数的变量而维持生存。

各分系统进行一组调节过程，它们据此能改变这三种流的流速、流量或特征。系统本身作为一个整体调节着全系统的变量。

这些过程中有许多是负反馈。单个或多个分系统组元之间

的反馈环容许任一组元的变化对系统的其他变化发生作用。朝向环境和来自环境的反馈环容许系统经过调节而达到其行为效果。在生命系统中还有一些正反馈。

生命系统中有六种调节过程：物能输入过程、信息输入过程、内部物能过程、内部信息过程、物能输出过程以及信息输出过程。

这些调节过程不仅使系统能维持稳态并经受住压力，而且使之能助长、发展、修复和维持其组元，还能使系统进行复制。

四、生命系统理论的基础研究

生命系统的基础研究，与各系统之间的一般化即对不同种类生命系统之间结构或过程的共同方面的探索有关。一般化可能是同一物种或类型中各个体之间的，也可能是同一层次上不同物种或不同类型系统之间的，或者可能是不同层次系统之间的。

尽管所有研究方法在生命系统研究中都有其适当的地位，但跨层次研究是其中最强有力的研究方法。跨层次研究力图发现两个或多个层次系统之间的同型性，并把在这些同型性基础上建立的模型应用到各种系统中去。这是一种有用的研究方法，因为这种方法能阐明早先尚未探获的规律性，而且能更深刻地揭示两个或多个层次生命系统的基本特性。

任何一种科学理论，都从它与它被应用于其中的实在现象的一致性，它在解决问题和回答问题时的有效性，以及它为一般科学作出贡献的程度中，获得它的可信性和最终的确认。因此，

关键的研究工作应该根据从中得到的可试验的假设来进行。

《生命系统》(J. G. 米勒, 1978 年)一书中所述的在生命系统理论上提出的 133 个可试验的跨层次假设一览表与其他一些假设是从那以后起得到了说明的。其中有些假设应用于所有层次, 其他则应用于两个或多个层次。

对来源于生命系统理论的假设所作的最早的多层次实验研究是对信息超载的研究 (J. G. 米勒)。这一曾在细胞、器官、生物体、群体与组织层次上得到证实的假设是:

当一个生命系统单信道的信息输入——单位为比特/秒——增加时, 信息输出——单位相同——起先几乎恒等地增加, 但当信息输出达到该信道中所不能超出的一定输出速率、信道容量之后就逐步下降。然后, 信息输出稳定在那个速率上; 而最后随着信息输入速率持续上升, 信息输出就逐渐下降趋近零, 或者发生超载下的混乱状态。

从 1960 年以来, 至少有 10 项跨层次研究已在各种调查报告和研究论文中报道 (J. G. 米勒, 1986 年)。

五、生命系统理论的应用

生命系统理论可用来分析和处理所有八个层次上的各个生命系统。它已在病症的诊断和治疗以及在为提高系统过程效率和效果所作的尝试中应用于一些经过挑选的系统中。

当一位内科医生检查病人时, 他用诊断用试药和仪器来检查器官系统的结构与过程。研究其他层次系统的生命系统方法也是类似的。其中包括观察和测定总体系统输入与输出之间的重要关系, 以及验明执行 20 个分系统过程中每个过程的结构。

还要检查该系统的物质流、能量流和信息流,以及各分系统和总体系统的调节过程。要分析系统的状况与功能,并与相同类型系统的平均或正常情况进行比较。如果系统的某种稳态正遭受破坏,就要为发现病症的原因和纠正这种病症而作出努力。

生命系统理论的应用方面的论文有些已经出版,有些正在出版之中(参看 Ruscoe, G. C., et al., 1985)。 (朴昌根译)

第七节 泛系理论

吴学清

泛系理论也叫做泛系方法论(PM:Pansystems Methodology)或泛系分析,是我国于1976年正式提出的一种跨学科新研究。它侧重从关系、关系转化与泛对称(广义对称)来分析一般事物机理与广义系统,特别是按现代科学充分可观测建模的方式来研究一些具有方法论意义的跨学科的概念(例如十八种所谓泛系概念)以及它们的应用,在不同学科群落的几十个专题中开拓了具体的前沿性的探索,许多科学理论(特别是多种系统理论与方法)或专题均可在泛系理论中找到新的缩影、新的联系与部分新的显微或深化,因而在现代多种大科学群中泛系理论将发展成为一种新型的横断研究与广义的观测(观测与控制)主体。

早在五十年代,侧重关系、关系转化与泛对称的这种泛系观就曾用来具体开创数学内横断性的逼近转化论,得到一系列自成系统的前沿性新结果。后来泛系观又成功地用于电磁介质动力学与教学和研究。对这些进展给予方法论上的总结与跨学科

泛化，这就成了泛系理论研究的一个较直接的动因。泛系理论研究的另一些激励可以说是来自知识爆炸的新形势，它急需发展处理知识的知识，急需发展方法论的科学化、现代化以至数学化和计算机化的研究，也急需更多的新原理与新方法来处理具有伤残信息或模糊因素的超繁动态生克大系统。泛系理论的研究更为深远的动因是中国传统哲理与方法论中潜科学性或前科学性的泛系观的科学显化，特别是在科学发展辩证综合与整体化趋势引导下与现代科学技术相结合的显化。

泛系理论概括或发展了的概念与原理有上百个，并且得到数百个具有数学形式的新结果，但是基本的概念有七组共十八种，即广义系统，转化，泛对称，泛系框架、显生、强化与关系。泛系关系指十二种一般事物机理或广义系统中的广义关系，即宏微、动静、局整（限定与扩展）、形影（赋形与投影）、因果、观控、生克、泛序（广义的次序）、串并、模拟、集散与异同。

泛系理论所讲的广义系统(S)是指某些称为（广义的）硬件的事物集合(A)与某些有关的所谓（广义的）软件或泛结构集合(B)的形式结合或软硬兼设体： $S = (A, B)$ 。这里（广义的）软件是指一般关系、关系的关系、动态关系、含参量的关系与结构等概念的引伸与推广。广义系统潜在概括了通常系统科学中的系统以及数理科学中的形式、量与结构等概念，可以用来描述事物，刻划性质、条件与规律。变化、运动、发展、转化与过程在形式上往往可用动态的或含参量的广义系统来表征，它们本身又可类聚而成为另外的广义系统。

广义软件（因而广义系统）一般可由泛系关系复合生成，特别是一些典型的形式可由局整关系和形影关系复合生成。泛系

关系可用集合论的形式把直观的涵义形式化，它们又可推广于某些广义系统。若引进关系的有序结合(例如记为星号 $*$)，则可由局整关系与形影关系公理式地定义许多典型的关系与转化，例如：鸟瞰 = 扩展 $*$ 投影；显微 = 限定 $*$ 赋形；缩影 = 限定 $*$ 投影；扩形 = 扩展 $*$ 赋形；显模拟(形形关系) = 投影 $*$ 赋形；隐模拟(影影关系) = 赋形 $*$ 投影；协模拟(缩影与缩影的关系) = 扩形 $*$ 缩影；准模拟(扩形与扩形的关系) = 缩影 $*$ 扩形；泛积 = 直积 $*$ 缩影；等等。这里直积就是由因子性的集取元素组合成高维元素而形成的集合，例如平面可看成横轴与纵轴的直积。多个因子集的直积的子集就叫做多元关系。可以把某些因子集作为泛权(广义的权重)，这时的多元关系叫做泛权关系。典型的有泛权场、泛权网和泛权场网。泛权关系族就叫做泛语，它是形式语言的推广，也是广义软件或广义系统的典型形式。泛系理论的研究发现，各种广义数系的发展及数理逻辑的典型建模手段即为泛积，而任何知识一旦化成泛语的形式也就能量化并能转到计算机上去处理。从泛系理论来看，微分、积分、变分、累加、差分、比率、导数、梯度等概念及它们的推广不外乎是广义硬件转化诱导下的某些关系或广义软件间的转化，这种诱导转化泛系理论称之为泛导或泛导数。利用泛导则更易于找到事物的规律性而便于建模，这一概念泛系理论称为泛导显称性。泛系理论具体地发展了泛权关系的复合转化概念以及离散形式下的泛语型泛导，它们对许多问题有用，相当于一种离散型的微积分。

泛系理论所说的泛对称是传统的对称性、相对性、协变性、协同性、优选性、稳定性、周期性等概念的引伸与推广，它指广义

系统转化中广义软件的相对守恒性或广义封闭性，也指变化与相对不变(多变与少变、自由与约束)或者简便与繁杂的联系与转化。规律性、广义系统性与整体性都与泛对称性有关。各种泛系关系都隐含有泛对称的因素。易经三易(易有三义：变易、简易、不易)、阴阳二仪、战势奇正、兵法数术等大都包含了某些泛对称概念的原型。

把一些泛系概念(或概念网，或网的转化)作为描述、分析、联系、运筹事物的概念性参证框架或坐标系，这种框架就叫做泛系框架。它大大扩展了一些泛系概念的应用范围。显化或选取某些泛系概念、关系或框架以便达到扬长避短、促生抑克、趋利避害、择优录取的目的，这种优显或优选就叫做泛系显生。利用泛系概念与泛系理论的方法来强化思维与运筹、观测与控制，这就叫做泛系强化。泛系理论特别重视所谓泛系化思维，它强调在分析或运筹事物时尽力做到多层次性高维化、动态性多样化、系统性比较化、泛系性扩变化与充分可观测性建模。这里所谓泛系扩变是指把事物对象按泛系关系来扩展而后按扩展的事物系统(称为泛环境)网的相关变异与相互观测来显生。

充分科学化、整体化、社会化、现代化、以及主动塑造、人工加速的泛系扩变叫做强化泛系扩变显生。利用泛对称或泛对称的转化来显生叫做泛对称显生。把局整、因果、观测、串并、模拟等结合起来的显生，它叫做五结合显生，它是控制论方法与技术的一种新的概括。把宏微、动静、观测、集散、生克等结合起来而扩形显生，这是对策、战争以及由劣势转为优势的重要概念，它叫做对策显生，由它可生发出一些补充孙子兵法的“五事七计”的新概念。价值工程与著名的波诺成才七法(见世界科学，11

(1984),35—37)都是一些特殊的因果显生技术,而统筹方法则与串并显生或因果关系的或与显生有关。侦查学与诊断学主要涉及溯因、限定与异同三结合的所谓侦查诊断显生。从泛系理论的观点来看,系统工程中的霍尔(Hall)原理主要是一种特化的泛序显生技术,而著名的尼仑堡(Nierenberg)创新术(见世界经济导报,273—275(1986))主要是一种特化的、结合异同、动静、生克与扩形多变的泛对称显生技术。对于超繁大系统的分析、识别(模式识别)一般需要某些缩影显生的分析方法与技术,包括按某些聚类准则而研究子系统间宏观的关系,在这些方面泛系理论发展了新的聚类理论。

泛系理论所说的观控是指广义的观测与控制。前者指探取或获得对象事物的状态或广义软件的情况与信息,后者指改变对象事物的状态或广义软件。观控的方式、方法、模式、机构简称观控模式,包括手段、仪器和工具以及某些中介系统。多个广义系统联立,它们的观测、控制、观控模式、泛环境、广义主体与客体,包括背景知识、信息、准则、运筹目标与不同层次不同扩变联系的观控,这一些往往形成一种多环的、动态的、有条件的、广义的“因果·生克·观控”网或网的网与网的进程,这种机理表现的概念叫做泛系观控相对性原理。在传统的认识论与心理学中,认识与实践主要表现为一种社会化观控相对性结合而分别侧重观测与控制的两种广义过程。感性认识与理性认识则分别属于社会化观控相对性结合中相对表层与深层的两种不同扩变联系的观控。实践与实验只有在充分可观测性模拟以及观控相对性合理结合的条件下才发挥较好的显生作用。通常所说的智力结构大都指一种特殊的观控模式。已知泛系观控相对性原理

是横贯不同学科领域几十个专题的一个重要概念。

从某种意义上讲，真主要表现与客观事物的泛对称性，善则表现为充分扩展的社会化的泛对称显生，美主要涉及（直接或间接的）真与善中的社会化泛对称或泛对称显生的对象化，而美感则是人在社会化观控相对性的动态交互过程中主客体相生达一定动情水平的对美的感受，包括主体在观控相对性中内在意识或潜意识性地对审美对象的引伸、升华、改造、再创造和泛系扩变显生与泛对称显生。美、美感与善一样，都有社会局整相对生克性，也涉及其它泛环境关系或明或暗的因子或参量的影响，它们的机理也与社会性有关的各种泛系显生原理相联系。形式美的法则都是一些泛对称的具体形式。强化泛系扩变与泛对称结合的两结合显生可以深化对真善美的认识，也是艺术美创作的一种方法论概念。表现在小说情节上则体现为在奇妙性、趋新性、需求不断逐级发展性、合理性以及与真或善的潜在拟合性等等约束下的自由显生。泛系理论研究了许多创新术，它可用于科学研究与艺术创作，特别是从原型素材到创作一般都表现为一种准模拟过程，因而准模拟显生可看成一种典型的创作术。鲁迅在总结自己的创作经验时提出的“采取一端说”就属于这种准模拟显生。历史上关于美的许多定义都可直接或间接地在我们引入的美的概念中找到某种缩影。

相容关系是事物中最基本的关系之一，它形式上要求有自返性（事物与自己相容）与对称性（A与B相容，则B也与A相容）。诸如等价性、同一性、混同性、协同性、兼容性、重演性、逼近性、模拟性、同层次性等都属相容性范畴。利用相容关系及其否定就可很一般地来刻划同与异。相容性在一系列运算与转化

下是相对封闭或守恒的，这叫做异同泛对称定理。这些运算与转化有交或合取、并或析取、关系逆、可交换性复合、传递包、直积、泛积、限定、投影、缩影、隐模拟、显模拟、显微、赋形以及所谓商化、积化、相容乘、相容除等等。泛系理论还具体地研究了其它关系在转化中的相对守恒性，连同上述结果统称为泛对称定理。利用泛对称定理就可进一步研究泛系聚类、模拟以及其它泛系关系的机理。特别是用于广义系统就导致所谓泛系层次原理与泛系全息重演律。前者侧重分析子系统内外或大系统与子系统(包括原系统与所谓商系统)之间在广义软件上的反差与趋异性，而后者则侧重大系统与子系统(包括子系统与子系统或各类模型)之间的相对共性。一者侧重异，另一者侧重同，形成广义系统基本属性的一种两极对偶，统称为泛系性二对偶原理，泛系理论为它们发展了一些数学模型。

社会往往是一个超繁的动态生克大系统，对它的分析与运筹，泛系理论总结了一些概念与原理，除了本文已经介绍的诸概念外，还有由广义机会与资源、它们的分配者或竞争者以及分配竞争规范这三者组成的所谓社会三大故以及对三大故按可控权的按权聚类分析。另外还有等价交换聚类分析以及因果(包括手段、条件与目标)相对独立性，等等。

泛系(Pansystems)一词系我国首先开始引用，它只在特定情况下指广义系统或某些特化的广义系统，而在大多数情况下是指一种研究倾向或指泛系概念以及有关的一大类方法的一种简称，有时也指按横断的泛系观发展的某些专题群落。泛系理论不同于流行的各种系统理论，也不同于一般的方法论与哲学，更与潜科学式的思辨性研究迥异。她不但侧重充分可观测建

模，而且努力发展数学化以至计算机化的研究。泛系理论除开对十多种数学专题的一些基础性的概念与定理有所补充或推广外，还对诸如逻辑学、控制论、系统论、方法论、医学、生态学等发展了专业性的新研究，在组织上也建立了全国性的具有几十个网点的泛系联络网，扬弃诸子百家而兴学海新流，形成了跨域结合、集体创业的新局面。

第八节 灰色系统理论

灰色系统及其研究特征

包含有确知(称为白的)和未知(称为黑的)或非确知(称为灰的)信息、关系、结构的系统，称为灰色系统。相应地，部分信息非确知的元素，称为灰元；部分信息非确知的数，称为灰数；部分信息非确知的关系，称为灰关系。比如零是灰元，人口是

灰数，科技进步与经济的关系是灰关系；社会是灰系统。

灰系统又可分为本征性的和非本征性的两类。工程技术系统，物理系统，生命系统等具有物理原型，是非本征性灰系统。社会、经济、环境、农业……等不具有物理原型，是本征性灰系统。本征性灰系统，其因素之间的作用原理不明确，结构与参数不具体，因素难以辨识，因素间关系隐蔽，行为特征难以准确了解，定量描述困难，信息完备与否无法判断，建立其定量模型，只能凭分析、推理。按分析推理建立的模型，充其量也只能认为是原系

邓聚龙

系统的代表,某种准则下的同构。

由于一般的理论与方法,难以解决这类系统的量化问题,从而迫使人们去为解决这类问题,寻找途径,这就是灰色系统理论诞生的背景。

事实上,在人类的活动领域内,绝对的准确、绝对的严格、绝对的清晰明瞭都是没有的。或者说,纯之又纯,白之又白的事物是不存在的。人们一向认为严格、清晰、明确的经典数学,虽然立论有据、推导严谨、逻辑严密,可是我们也不能不看到它仍然带有“不严格”、“不确定”、“不明确”的烙印。比如无穷小,无穷大,原点、极限究竟是什么,又有谁能说得很清楚呢?又有谁能确切切地说出无穷小是多小的数,无穷大是多大的数呢?原点究竟是一个点,还是一个点的邻域呢?事实上,“无穷小”、“无穷大”都是灰数。极限则是灰数的一个最大权白化值。从某种意义上说,现有的数学分析就是建立在灰色的基石上的。数学分析以微分、导数为主要内容,微分导数来源于极限与收敛,而极限收敛又是以无穷小作为基础的,这不就说明了数学分析与灰数的关系吗?

事实上,我们日常接触的许多事物是灰的,我们的认识是由灰逐步白化的,我们的思维方式是灰的。一句话,我们自觉不自觉地生活在灰的世界里,谁想摆脱也是摆脱不了的。我们只有迎着灰的世界前进,才有可能深化认识、开拓活动领域、增强能力。

由于灰色系统理论的研究对象信息不完全、准则多重性,从前因到后果,往往是多一多映射,是灰映射。因此,灰色系统的解一般是非唯一,即解不是一个,而是多个,是一个集合。

基于上述认识，我们可以将灰色系统理论的主要研究内容概括为分析、建模、预测、决策、控制等。

下面按上述五个内容介绍灰色系统的内容大意。

第一个问题 灰色系统分析

灰色系统理论提出了一种新的系统分析方法，即系统的关联度分析方法。这是根据因素之间发展态势的相似或相异程度，来衡量因素间的关联程度。

比如某地区有三个经济数列，即总收入、养猪收入、养兔收入

年 分	1979	1980	1981	1982	1983
x_1 (总收入)	300	400	360	500	540
x_2 (养猪收入)	16	24	27	34	48
x_3 (养兔收入)	22	14	30	24	30

将 x_1 (总收入)、 x_2 (养猪收入)、 x_3 (养兔收入)作图，得图 9·19。图中曲线②的发展态势与曲线①较接近，曲线③与曲线①态势相差较大，便认为②与①关联程度大，③与①关联程度小。该地区应该大力发展养猪，同时研究养兔技术，分析导致养兔发展波动的原因。

由于关联度分析方法，是按因素间发展态势作分析，因此对样本量的多少几乎没有要求(不少于三个)，也不需要典型的分布规律，计算量小，哪怕是几十个变量的关联度也可用手算，且不致出现关联度的量化结果与定性分析不一致的情况。

关联度分析，现在已用到农经、水利、材料科学、宏观经济等多个方面。比如山西汾河水库上游输沙量分析、山西果树产量分析、湖北省宏观经济分析、东北红松生长的生态分析、金属材

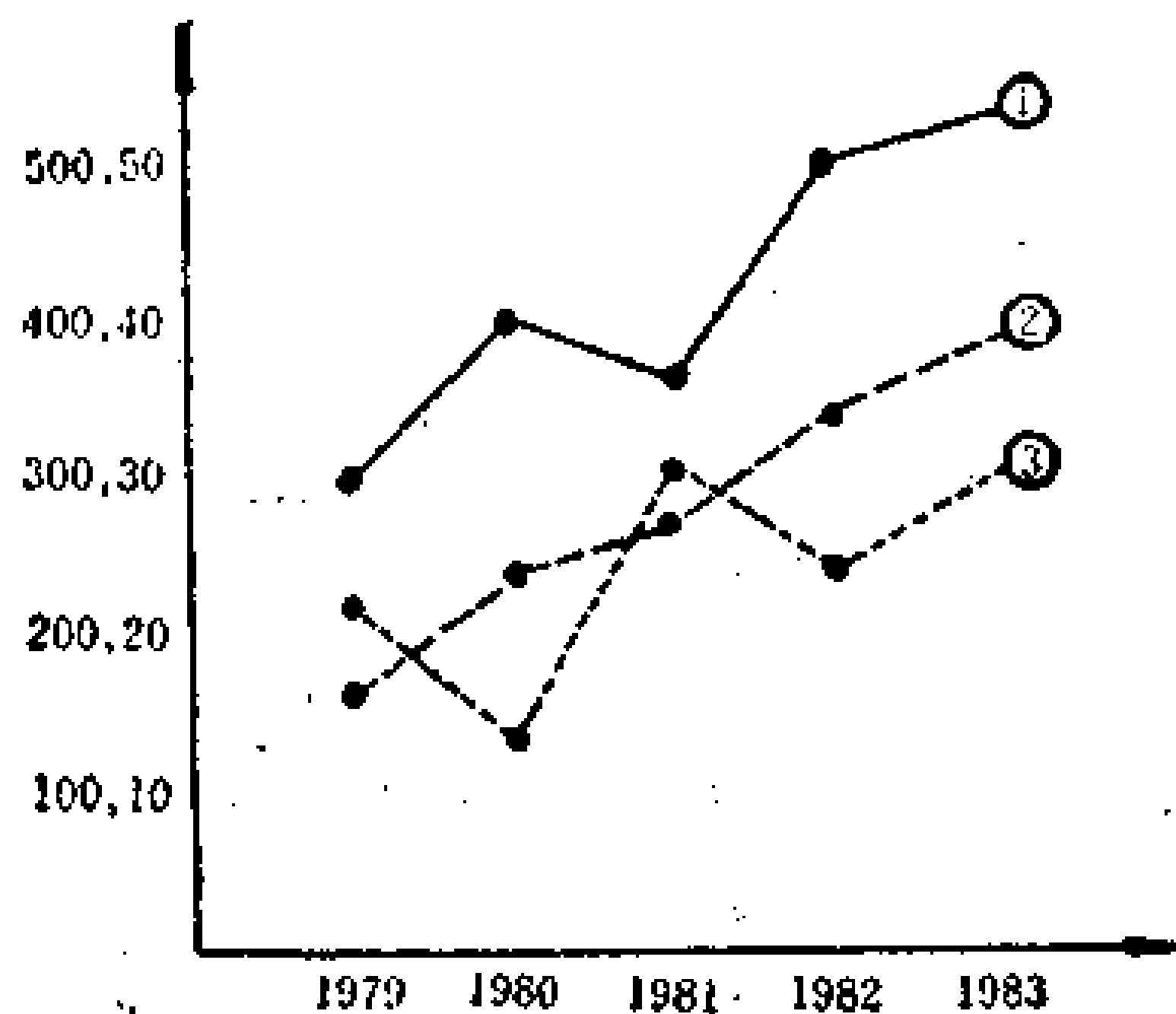


图 9-19 并联度分析图

料性质分析等多个方面,都得到了满意结果。

对对象系统作关联度分析,首先要选准因素的代表量,或者说找准能反映系统行为的映射量。

- 法国的人口学家曾统计和研究过中国的宋、元、明、清等各个朝代的人口,这些人口数字都不是直接统计的,而是根据中国这几个朝代食盐的销售量推算出来的。因为人每天食盐消耗量是比较固定的。

- 用照相行业的收入反映社会精神面貌的变化,也是可以考虑的。一般来说,人们心情高兴,生活不愁,才有心情去考虑照相留念。

- 用医院挂号费作为健康水平的映射量。

- 用刑事案件发案率来代表和反映社会治安和社会秩序。

- 用新产品的产值占新增产量的百分比来反映科技进步对经济发展的作用。

- 用人均国民收入来反映经济发展的水平。
- 用平均受教育年限来反映社会的发达程度。

以上这些是一些社会现象的映射量。当有了系统行为数据列（即各个时刻的数据映射量）后，根据关联度计算公式便可求出关联度，也可将数据输入计算机，通过关联度计算软件算出结果（见王学萌、罗建军编著《灰色系统预测决策建模程序集》）。

关联度不仅仅是一种系统分析方法，将其拓广为关联空间后，也是灰色系统的理论基础。

第二个问题 灰色系统模型的建立

灰色系统理论建模的主要任务，是根据社会、经济、农业、生态等系统的行为数据，找因素之间、数据之间或因素本身的数学关系。现有的其他建模方法，是用离散数据列建立一个按时间作逐段分析的模型，即递推的离散模型。

而灰色系统理论，解决了一向认为不能解决的连续微分方程建模的问题。为什么灰色系统理论能够解决这个问题呢？其要点之一是灰色系统理论有一种新观点，即认为任何随机过程都是在一定幅值一定时区内变化的灰色量，并且称随机过程为灰色过程。在处理上，灰色过程是通过原始数据的整理运算来寻找规律，这叫数的生成，这是一种就数找数的现实规律（而不是统计规律）的途径。

累加生成，是灰色建模中常用的生成方法。现在已从数学上证明了光滑离散函数的累加生成是近似的指数函数。也可以通过数据处理，看到累加指数律的趋势。比如有下述原始数列

序 号	1	2	3	4
数 据	$x^{(0)}(1)$	$x^{(0)}(2)$	$x^{(0)}(3)$	$x^{(0)}(4)$
	1	2	1.5	3

将上述数据作图,得图 9·20

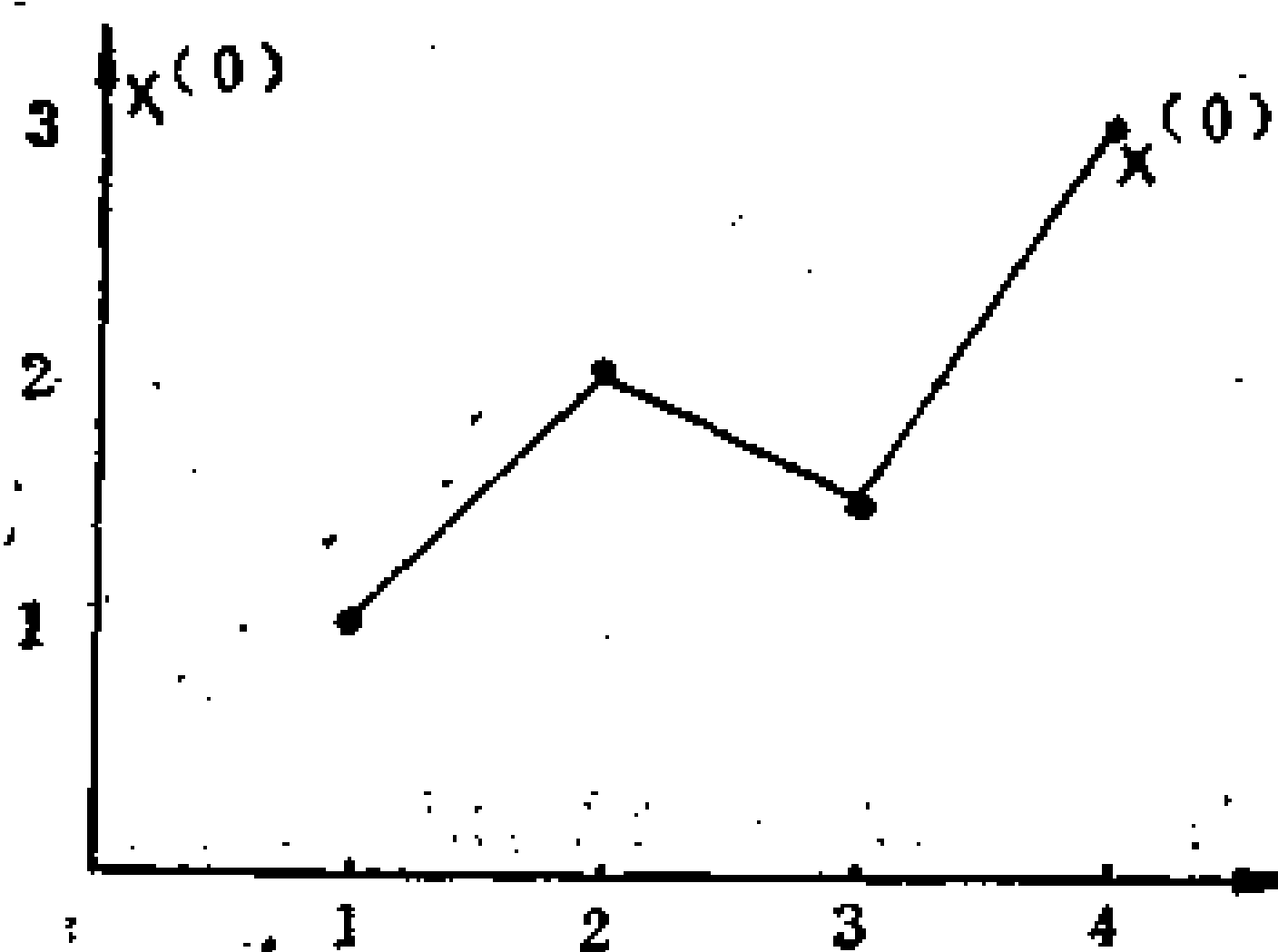


图 9·20

从图 9·20 看到,原始数据是摆动的,没有明显的规律。如果对 $x^{(0)}$ 作累加,得 $x^{(1)}$

$$x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1) = 1$$

$$x^{(1)}(2) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) = x^{(1)}(1) + x^{(0)}(2) = 1 + 2 = 3$$

$$x^{(1)}(3) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) + x^{(0)}(3) = x^{(1)}(2) + x^{(0)}(3) = 3 + 1.5 = 4.5$$

$$x^{(1)}(4) = x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) + x^{(0)}(3) + x^{(0)}(4) = x^{(1)}(3) + x^{(0)}(4) = 4.5 + 3 = 7.5$$

$x^{(1)}$ 的数列如下

序 号	1	2	3	4
数 据	$x^{(1)}(1)$	$x^{(1)}(2)$	$x^{(1)}(3)$	$x^{(1)}(4)$
	1	3	4.5	7.5

将 $x^{(1)}$ 作图, 得图 9·21

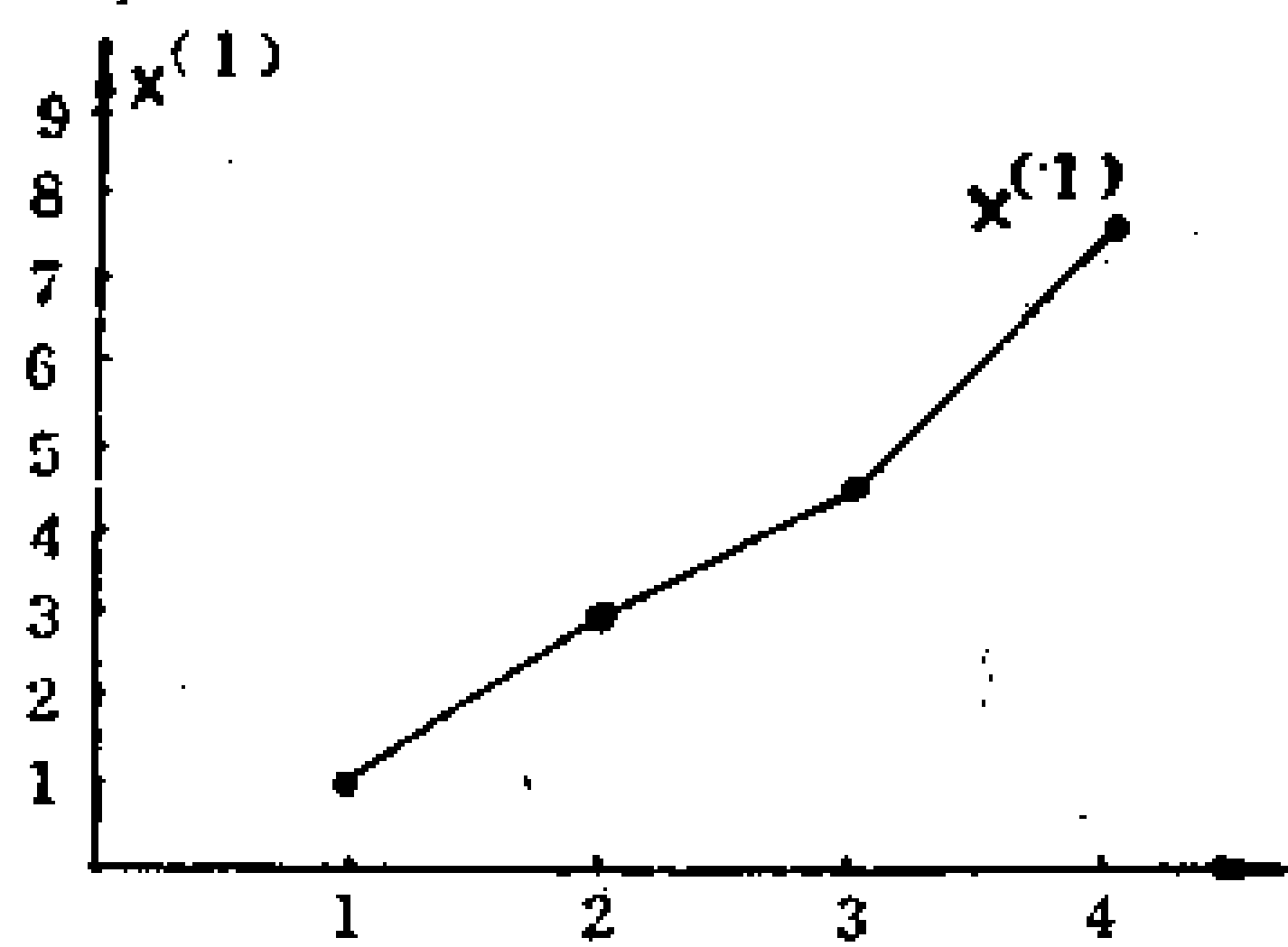


图 9·21

从上图看出, $x^{(1)}$ 有递增的特征, 即规律性比 $x^{(0)}$ 有明显加强。

事实上, 将许多实际的原始数据作累加生成后, 都有明显的规律, 比如图 9·22 全国粮食产量曲线, 图 9·23 某市自行车销售曲线。

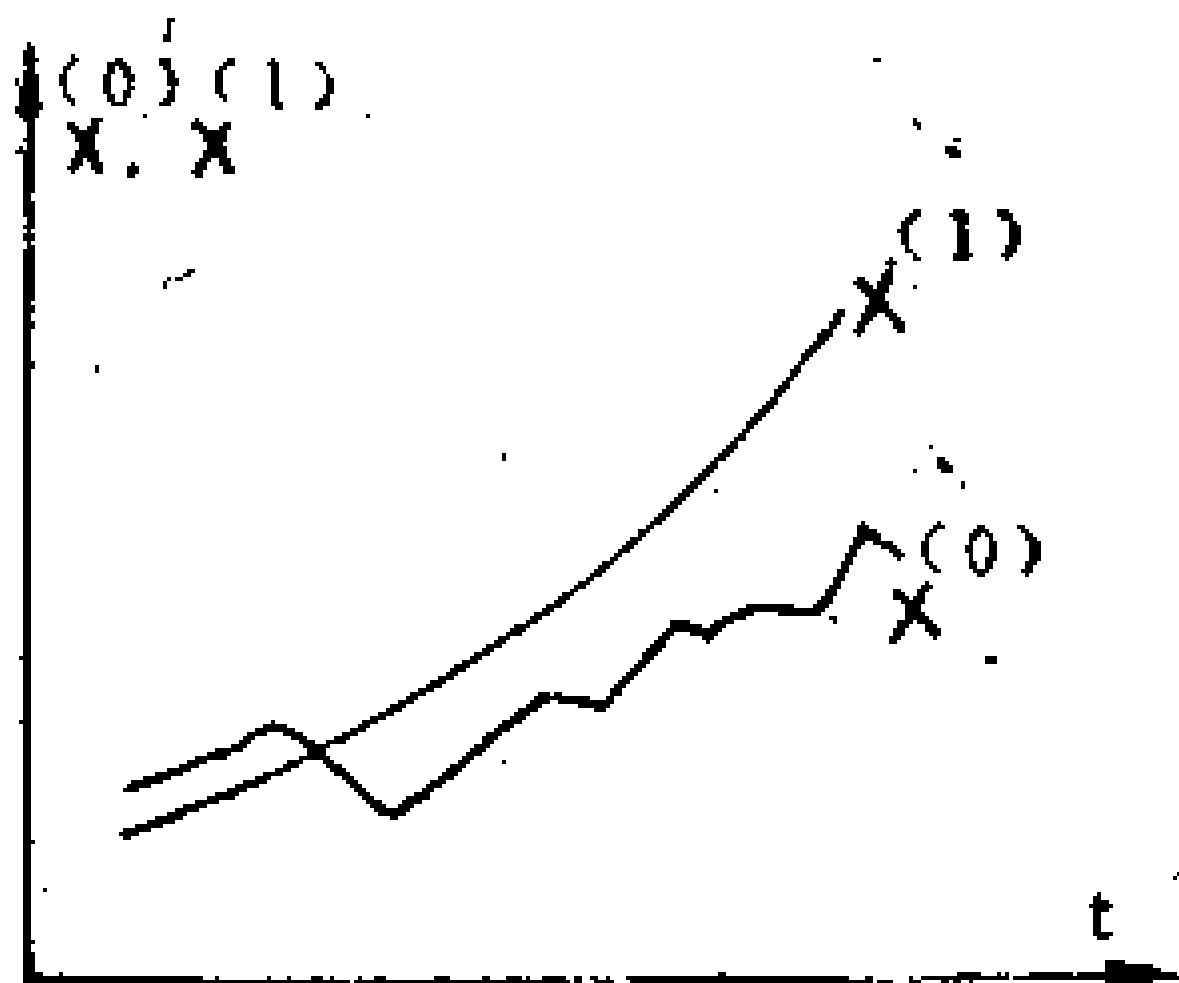


图 9·22 全国粮食产量

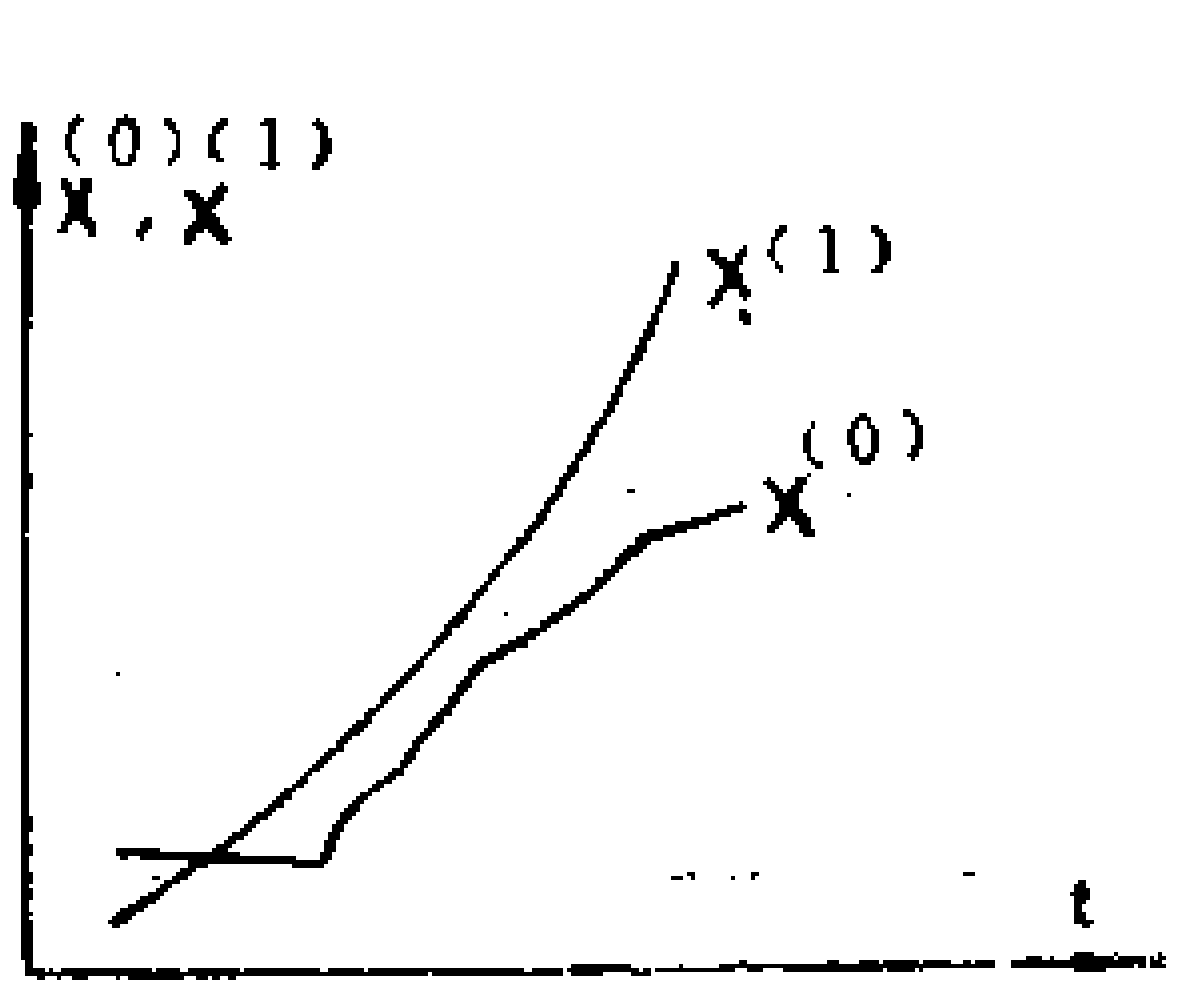


图 9·23 某市自行车销售

由于生成的数据列有了近似的指数规律, 因此微分建模才

有了基础。

不过建立微分方程模型，还要用到灰色系统理论的其他成果，比如关联空间、离散函数的光滑性、微分方程的偶对、背景值、平射等概念。

在建立系统模型时，按灰色系统理论分为五步，称为五步建模。

第一步 语言模型

对所研究的问题，明确目的、方向、目标、因素、关系等，然后用简炼的语言描述，这便是语言模型，如“对外开放，对内搞活经济”等精辟论述，就是一种语言模型。

第二步 网络模型

网络模型，亦称因素分析模型、因素关联模型、或框图模型。

语言模型中包含的因素，有些是明显的，有些是潜在的，将所有显现与潜在的因素，按前因与后果配成对，并用框图与箭头表示，得图 9·24 的形式，称为一个环节。通常同一个因素，它既是前一个环节的后果，又是后一个环节的前因，将所有这些关系都用方框与箭头表示，便可得到系统各个环节的总方框图，见图 9·25，称网络模型。

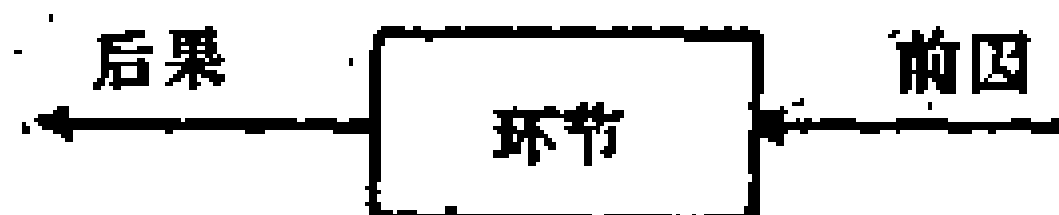


图 9·24 一个环节

前因与后果在经济领域内是投入与产出，在控制系统中是输入与输出。

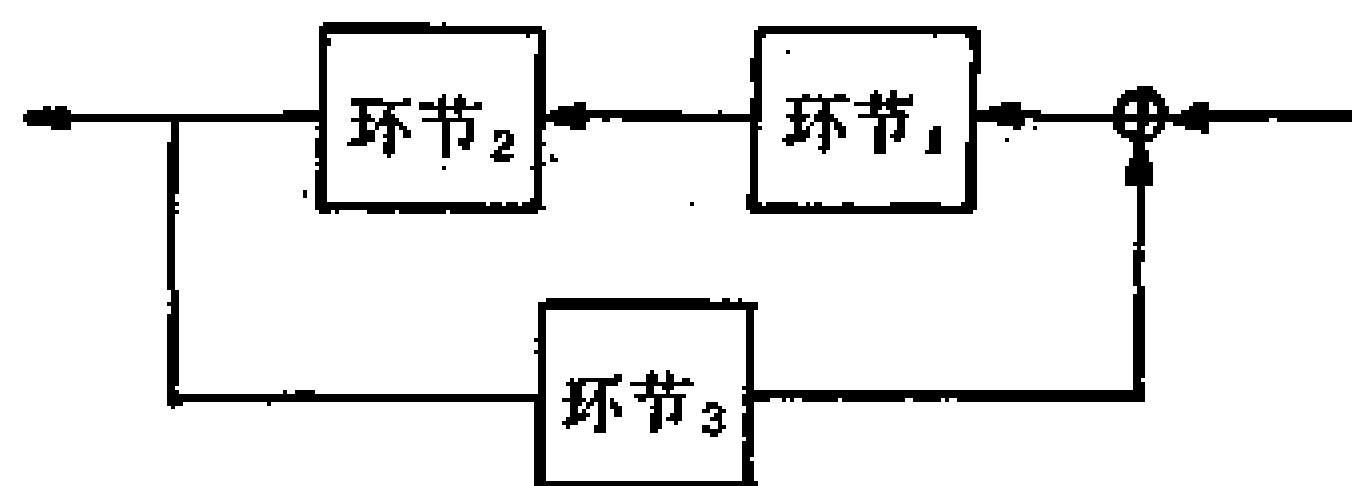


图 9·25 网络模型

第三步 量化模型

找出每一个环节前因与后果的数量关系,填入方框内,便得

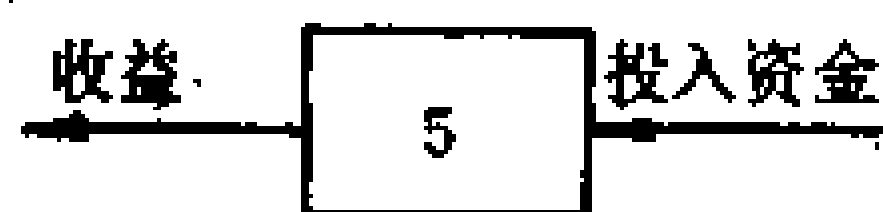


图 9·26 量化模型

到量化模型。比如某商店一元资

金的投入,可以得到 5 元的收益,

投入资金是前因,收益是后果,前

因与后果的数量比是 5,将 5 填

入方框内,见图 9·26,便得到量化模型。

第四步 动态量化模型

将每一对前因与后果各时刻数据,整理成数列,作生成

后,再按灰色系统的 $GM(1,N)$ 模型建立动态数量关系,便得

到动态量化模型。比如某店几年来的投入资金与收益的数据都

齐全,便可按 $GM(1,Z)$ 建立投入资金与收益间的动态量化模

型。

第五步 优化模型

通过动态模型可以分析系统发展态势,判断发展态势是否

令人满意。对于发展态势不够满意的系统,通过环节的增加、参

数的改变、作用点的移动等手段,改造系统,使其满意。具有满意

品质的模型,称优化模型。

灰色模型已用在我国经济分析,各行业预测,系统决策等方

面。它预示了湖北省到 2000 年经济翻两番的可喜前景;它准确

地预测了汉阳火车站 1984 年装车数,误差只有 11 个车皮;它指出了我国十一届三中全会以来政策与科技进步对经济促进的量化关系。

第三个问题 灰色预测

用灰色模型 $GM(1,1)$ 进行预测,称灰色预测。灰色预测从其功用与特征可分为五类:

(1) 数列预测 对某个事物发展变化的大小与时间进行预测,称数列预测。比如粮食预测便是预测未来粮食产量的多少。在这里有两个数要计算,一个是粮食,另一个是发生的时间。

(2) 灾变预测 这里的灾变预测,严格说来是异常值的预测,比如某地区预测涝年,可以用年平均降雨量多于 2000 毫米的年份代表;预测旱年,可以用年平均降雨量小于 400 毫米的年份代表。预测欠(丰)收年,可以用收获量小(多)于多少的年份代表。

(3) 季节灾变预测,发生在一年中某个季节,或某个特定时区内的预测,称季节灾变预测。比如预测春雨,是发生在春季的降雨量的预测;预测早霜;是冬季第一次出现霜冻的预测。

季节灾变预测与灾变预测有共同点,也有不同点,共同点是都以异常值的出现作为预测的目的。不同点是,季节灾变仅指一年内特定时区的灾变,其他时区内没有意义。

(4) 拓扑预测 拓扑预测亦称波形预测,整体预测。它是用 $GM(1,1)$ 模型预测未来发展变化的整个波形。因为许多点可以构造一个波形,所以拓扑预测,是图上等高点的预测。对于图上的每一个给出的等高点,都可以得到一串横坐标数列,将此数

列按 $GM(1,1)$ 建模，可以预测该等高点未来发展变化的情况，许多等高点的组合，便是未来的波形。

(5) 系统预测 由许多个可以用 $GM(1,1)$ 模型描述的因素，构成一个 $GM(1,N)$ 模型，然后对所有因素的发展变化同时预测，便是系统预测。比如杨亚光、谢远涛在研究河北栾城县的农牧业发展模型时，就建立了人口、单位面积粮食产量、种植业与畜牧业收入等几个因素构成的系统模型。模型中人口、单位面积产量均可用 $GM(1,1)$ 描述。

第四个问题 灰色决策

建立在灰色模型(比如 $GM(1,1)$) 基础上的决策与规划，如灰色规划、灰色层次决策等，以及灰色局势决策，统称为灰色决策。

局势，是事件与对策的匹配。

下面举例，对局势决策作简要介绍。比如，下雨是一个事件，为了对付下雨可以带伞、穿雨衣、戴斗笠，这便是对付下雨的三个对策。这三个对策那个最好呢？这要看效果，而效果与目标有关，不同目标对效果好坏的评价是不同的。比如考虑经济、美观、轻便三个目标。从经济看斗笠最好，但美观与轻便要差些。从美观看，雨衣最好，但经济与轻便差些，而伞则介于二者之间。这样一来，按一般方法就难以评定对策的好坏。现在将三个目标当作三个坐标，构成一个三维空间。这样每个对策从效果来看，都是空间的一个点。然后以进入某区域的点，当作满意的点，该点所对应的局势为满意局势，满意局势中的对策为满意对策。这个区域称为满意区，或称灰靶。

这个例子便可作下述量化。

局势 1 = (下雨, 伞), 局势 2 = (下雨, 雨衣), 局势 3 = (下雨, 斗笠)

目标 1: 经济 目标 2: 美观 目标 3: 轻便

对局势效果按 3 级进行比较后, 有

	1级	2级	3级
经济:	局势3	局势1	局势2
美观:	局势2	局势1	局势3
轻便:	局势3	局势1	局势2

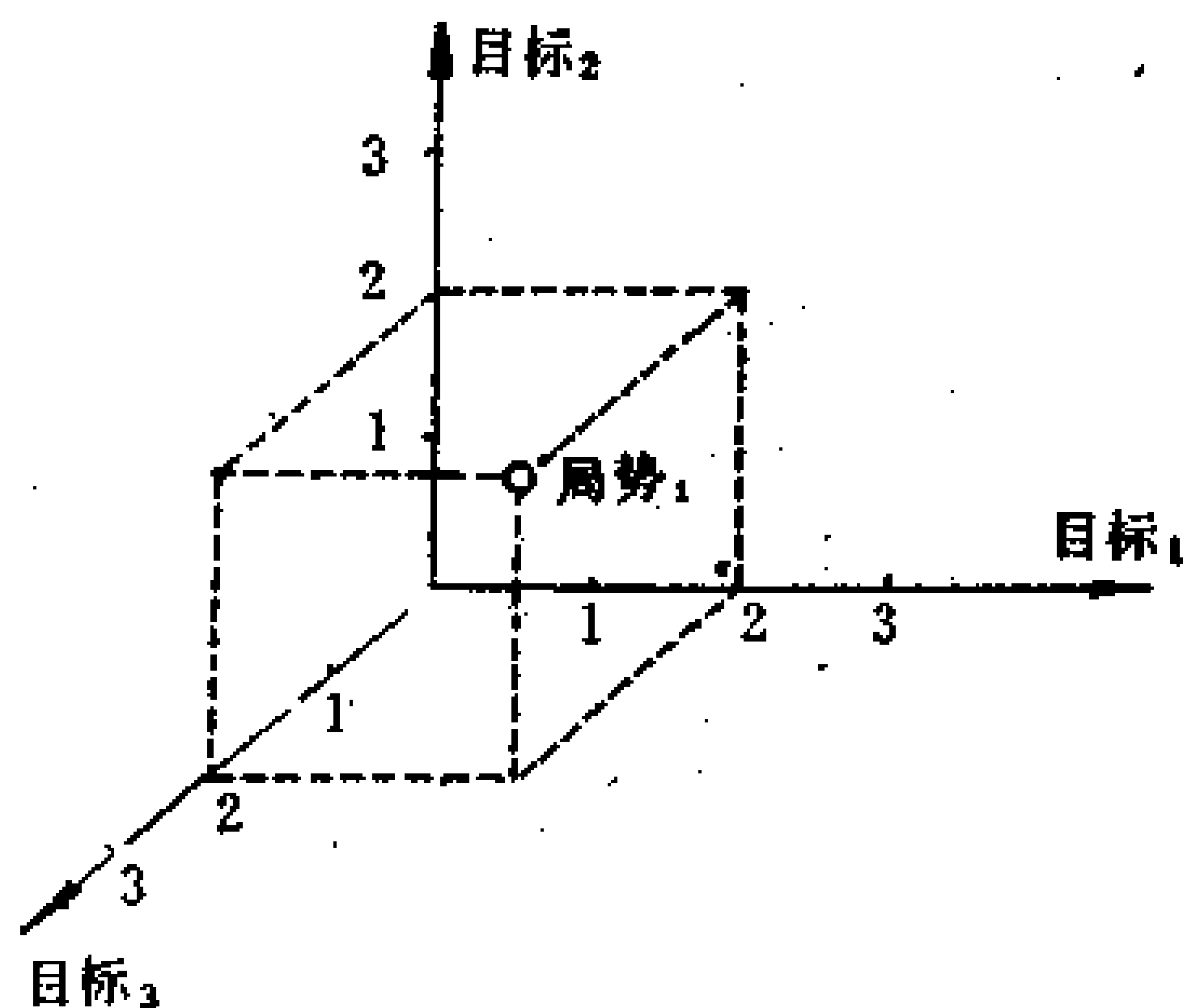


图 9.27

从而有下述三个效果向量:

- 局势 1 的效果向量 $\gamma_1 = (2, 2, 2)$
- 局势 2 的效果向量 $\gamma_2 = (3, 1, 3)$
- 局势 3 的效果向量 $\gamma_3 = (1, 3, 1)$

将向量作图 9.27, 并设原点为圆心, 半径为 2 的 $\frac{1}{4}$ 球面为灰靶,

可判断局势 1 为满意局势。

第五个问题 灰色控制

决策的执行称为控制。比如商业活动中，当预测某种商品价格将上涨，则输入大量商品，以获取利益，或将输入商品以较低价格投入市场，以稳住价格，这都是控制。

此外，我们还可以按灰色预测的机制，构造灰色预测控制器，控制生产过程，提高生产力。武汉工学院黄石分院程颢等已首次研制出灰色预测控制器，已用于黄石电厂 300 吨锅炉的给水系统，获得很好的效果。1986 年 4 月通过了湖北省科委主持的技术鉴定。鉴定表明灰色预测控制器各方面的指标，都优于现有的 1985 年湖北全省质量第 1 名的 PID 系统。灰色预测控制器的诞生，标志着控制器进入了一个新的历史阶段。表明了一种可以防患未然的预防型控制方式，将取代现有的基于事后控制机制的被动型控制方式。

据不完全统计，目前灰色系统理论已应用到 20 多个方面和许多领域，如农业区划、灌溉、粮食预测、石油开采、材料科学、气象、水利、体育、交通、教育、政法等。

主要参考文献

- [1] 马克思:《资本论》,人民出版社 1975 年版。
- [2] 恩格斯:《自然辩证法》,人民出版社 1984 年版。
- [3] 列宁:《哲学笔记》,人民出版社 1974 年版。
- [4] 克劳斯,G.:《从哲学看控制论》,中国社会科学出版社 1981 年版。
- [5] 库兹明,B. И.:《马克思理论和方法论中的系统性原则》,生活·读书·新知三联书店 1980 年版。
- [6] 尼·伊·茹科夫:《控制论的哲学原理》,上海译文出版社 1982 年版。
- [7] 乌约莫夫,A. N.:《系统方式和一般系统论》,吉林人民出版社 1983 年版。
- [8] 萨多夫斯基,B. H.:《一般系统论原理》,人民出版社 1984 年版。
- [9] 拉兹洛,E.:《用系统论的观点看世界》,中国社会科学出版社 1985 年版。
- [10] 普利高津:《从存在到演化》,上海科技出版社 1986 年版。
- [11] 尼科里斯,普利高津:《探索复杂性》,四川教育出版社 1986 年版。
- [12] 罗森勃吕特,维纳,毕格罗:《行为、目的和目的论》,《控制论哲学问题译文集》第一辑,商务印书馆 1965 年版。
- [13] 维纳:《控制论》,科学出版社 1963 年版。
- [14] 维纳:《人有人的用处》,商务印书馆 1978 年版。
- [15] 艾什比:《控制论导论》,科学出版社 1965 年版。
- [16] A. Я. 列尔涅尔:《控制论基础》,科学出版社 1981 年版。
- [17] 诺顿,M.:《现代控制理论》,科学出版社 1979 年版。
- [18] 欣内尔斯,S. M.:《现代控制系统理论及应用》,机械工业出版社 1979 年版。
- [19] 兰格,O.:《经济控制论导论》,中国社会科学出版社 1981 年版。
- [20] 汉肯:《控制论与社会》,商务印书馆 1985 年版。
- [21] 格洛里索,R. M.:《工程控制》,科学出版社 1981 年版。
- [22] 阿尔贝勃,M. A.:《大脑、机器和数学》,商务印书馆 1982 年版。

- [23] 申农:《通信的数学理论》,上海市科学技术编译馆编《信息论理论基础》,上海市科学技术编译馆,1965年版。
- [24] 罗斯, A. M.:《信息与通信理论》,人民邮电出版社。
- [25] 藤田广一:《基础信息论》,国防工业出版社。
- [26] 阿坦斯, M. 等:《系统、网络与计算:多变量法》,人民教育出版社1979年版。
- [27] 日本科学技术厅编:《系统工程学的现状与展望》,中国社会科学出版社1983年版。
- [28] 三浦武雄、浜冈著:《现代系统工程学概论》,中国社会科学出版社1983年版。
- [29] 克朗, R. M.:《系统分析和政策科学》,商务印书馆1985年版。
- [30] 秋山穰、西川智登:《系统工程》,机械工业出版社1983年版。
- [31] 钱学森等:《论系统工程》,湖南科技出版社1982年版。
- [32] 钱学森,宋健:《工程控制论》,科学出版社1980年版。
- [33] 郝柏林、于渌等:《统计物理学进展》,科学出版社1981年版。
- [34] 李继宗、邹珊刚、黄麟维:《系统论的发展及其哲学意义》,中共中央党校自然辩证法研究班编《自然科学中的世界观与方法论》,求实出版社1983年版。
- [35] 沈小峰、王德胜:《自然辩证法范畴论》,北京师范大学出版社1986年版。
- [36] 傅世侠:《科学前沿的哲学探索》,辽宁人民出版社1983年版。
- [37] 汪应洛 黄麟维主编:《系统思想与科学技术发展战略研究》,西安交大出版社,1985年版。
- [38] 黄麟维,李继宗,邹珊刚:《系统思想与方法》,陕西人民出版社1984年版。
- [39] 湛昆华等:《普利高津与耗散结构理论》,陕西科学技术出版社1982年版。
- [40] 李如生:《非平衡态热力学和耗散结构》,清华大学出版社1986年版。
- [41] 吴学谋:《逼近转化论与数学中的泛系概念》,湖南科学技术出版社1984年版。
- [42] 黄麟维、邹珊刚、李继宗:《系统的结构与功能初探》,《系统理论中的科学方法与哲学问题》,清华大学出版社1984年版。
- [43] 涂序彦等:《生物控制论》,科学出版社1980年版。
- [44] 邓聚龙:《灰色控制系统》,华中工学院出版社1985年版。
- [45] 邓聚龙:《灰色系统(社会·经济)》,国防工业出版社1985年版。
- [46] 王慧炯:《系统工程学导论》(上),上海科技出版社1980年版。
- [47] 汪应洛主编:《系统工程》,机械工业出版社1986年版。

- [48] 中国科协普及部:《系统工程普及讲座汇编》,1980年。
- [49] 上海科学技术协会、上海电视台:《系统工程》电视教育讲座,1980年。
- [50] 《系统工程论文集》,科学出版社1981年版。
- [51] 周志诚主编:《现代管理方法》,经济管理出版社1985年版。
- [52] 黄孟著:《决策的科学方法》,海洋出版社1983年版。
- [53] 孙耀君:《西方企业管理理论的发展》,中国财政经济出版社1981年版。
- [54] 霍俊:《实用预测学》,中国展望出版社1984年版。
- [55] 邹珊刚:《系统性原理研究》,《自然信息》1984年第2期。
- [56] 李继宗:《系统科学的产生与辩证思维的发展》,《求索》1983年第6期。
- [57] 朱葆伟、李继宗:《辩证思维在现代科学中的进展》,《哲学研究》1983年第10期。
- [58] 刘永振:《论系统的协同作用》,《中国社会科学》1985年第2期。
- [59] 朴昌根:《论系统科学体系》,《系统工程理论与实践》1985年第2期。
- [60] 朴昌根:《国外系统理论研究》,《自然辩证法研究》,1980年第1—3期。
- [61] 贝塔朗非, L. V.:《关于一般系统论》,《自然科学哲学问题丛刊》,1984年第4期。
- [62] 郝柏林:《分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其它》,《物理学进展》1983年第3期。
- [63] 朴昌根:《系统分类学初探》,《系统工程》1987年第1—2期。
- [64] 袁发平、苏子仪、彭纪南:《管理与控制》,《自然信息》1985年第4期。
- [65] 黎鸣:《论信息》,《中国社会科学》1984年第4期。
- [66] 刘长林:《论信息的哲学本性》,《中国社会科学》,1985年第2期。
- [67] Laszlo, E.: Introduction to Systems Philosophy, New York, Jordan and Breach, 1972.
- [68] Bunge, M.: A Systems Concept of Society: Beyond Individualism and Holism, in General Systems, Yearbook of the Society for General Systems Research. Vol. 24, 1979.
- [69] Bertalanffy, L. v.: Problems of Life, New York, Wiley, 1952.
- [70] Bertalanffy, L. v.: General System Theory, New York, George Braziller, 1968.
- [71] Kfir, G. J.: Trends in General Systems Theory, New York, Wiley, 1972.
- [72] Mesarovic, M. D.: Views on General Systems Theory, New York, John Wiley, 1964.

- [73] Wymore, A. W.: A Mathematical Theory of Systems Engineering, New York, John Wiley, 1967.
- [74] Kltz, G. J.: An Approach to General Systems Theory, Princeton (N. J.), Nostrand, 1968.
- [75] Faurre, P. and Depuyrot, M.: Elements of System Theory, Amsterdam. New York. Oxford, North-Holland, 1977.
- [76] Kalman, R. E.: Lecture on System Theory, 在中国科学院所作的讲座, 1980 年。
- [77] Lillienfeld, R., The Rise of Systems Theory, New York, John-Wiley & Sons, 1978.
- [78] Haken, H.: Synergetics—An Introduction, Berlin, Springer-Verlag, 3rd ed 1983.
- [79] Haken, H.: Advanced Synergetics, Berlin, Springer-Verlag, 1983.
- [80] Miller, J. G.: Living Systems, New York, McGraw-Hill, 1973.
- [81] Miller, J. G. and Miller, J. L.: The Earth as a System, Behavioral Science, (27) 1982, 303—322.
- [82] Eigen, M. and Schuster, P.: The Hypercycle, Berlin, Springer-Verlag, 1979.
- [83] Флэшман, Б. С.: Основы системологии, М: Радио и Связь, 1982.
- [84] Miller, J. G.: Information input overload and psychopathology, American Journal of Psychiatry, 116, 695—704(1960).
- [85] Miller, J. G.: Can Systems Theory Generate Testable Hypotheses? From Talroft Parsons to Living Systems Theory. Systems Research, 3, 73—84(1986).
- [86] Ruscoe, G. C., Fell, R. L., Hunt, K. T., Merker, S. L., Peter, L. R., Carry, J. S., Miller, J. G., Loo, Cpt., Reed, Opt. & Sturm, Cpt.: The Application of living Systems Theory to 41 U.S. Army Battalions. Behavioral Science, 30, 7—50(1985).

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 系统科学 8 7 1 1

作者 =

页数 = 4 6 6

S S 号 = 1 0 3 4 0 3 9 6

出版日期 =